



Processamento de nuvens de pontos para estudos do património cultural: caso do Mosteiro de Alcobaça

Cláudia Filipa Aguiar da Silva

Mestrado em Engenharia Geográfica

Trabalho de Projecto orientado por:
Professora Doutora Paula Maria Ferreira de Sousa Cruz Redweik

Este relatório foi escrito, por opção pessoal, não tendo em consideração as alterações gráficas previstas pelo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, aprovado pela Resolução da Assembleia da República n.º 26/91, de 23 de Agosto.

RESUMO

O Mosteiro de Santa Maria de Alcobaça (Alcobaça, Leiria, Portugal), fundado em 1153, constitui um dos mais importantes monumentos legados pela Ordem de Cister em toda a Europa. Em 1989, foi inscrito na Lista do Património Mundial da UNESCO, sendo a sua igreja considerada um dos expoentes máximos da arquitectura medieval europeia. Desde 2009, integra a Rota das Abadias Cistercienses, Itinerário Cultural do Conselho da Europa.

Considerando a importância deste monumento em Portugal e no Mundo, pretende-se documentar a evolução da arquitectura e dos métodos construtivos ao longo das diversas fases de construção, através do levantamento com tecnologia *Laser Scanning* Terrestre (TLS) e técnicas fotogramétricas de restituição múltipla automática.

A utilização da fotogrametria incide, exclusivamente, sobre os túmulos de D. Pedro I e D. Inês de Castro (obras primas da tumulária medieval europeia), preservados na igreja monástica de Alcobaça, para os quais são produzidos modelos tridimensionais (3D) e ortomosaicos. O TLS foi aplicado ao Claustro de D. Dinis, à Igreja do Mosteiro, à Sacristia Nova e à Capela Relicário, com o intuito de se obter cortes longitudinais, transversais e em planta, superfícies 3D, projecções ortogonais e modelos 3D, para uma análise concreta de elementos arquitectónicos e respectiva avaliação métrica.

Toda a documentação final obtida contribuirá não só para o melhor conhecimento do monumento mas também para a sua conservação.

Palavras-chave: Fotogrametria, LiDAR, Nuvem de pontos, Modelação 3D, Património

ABSTRACT

The Monastery of Santa Maria of Alcobaça (Alcobaça, Leiria, Portugal), founded in 1153, is one of the most important monuments of the Order of Cister's legacy throughout Europe. In 1989, it was inscribed in the World Heritage List of UNESCO, being its church considered one of the maximum exponents of the European medieval architecture. Since 2009, it has been part of the Route of the Cistercian Abbeys, Cultural Route of the Council of Europe.

Considering the importance of this monument in Portugal and in the World, it is intended to document the evolution of architecture and construction methods throughout the various phases of construction, through the survey with Laser Scanning Terrestrial (TLS) technology and multiview photogrammetric techniques.

The use of photogrammetry focuses exclusively on the tombs of King Pedro I and Inês de Castro (masterpieces of the medieval European tombs), preserved in the Church of Alcobaça Monastery, for which three-dimensional (3D) models and orthomosaics photos are produced. The TLS was applied to the Cloister of King Dinis, the Monastery Church, the New Sacristy and the Relicário Chapel, with the purpose of obtaining longitudinal and transversal sections, plants, 3D surfaces, orthogonal projections and 3D models, for a concrete analysis of architectural elements and their metric evaluation.

All the final documentation obtained will contribute not only to a better knowledge of the monument but also to its conservation.

Key-words: Photogrammetry, TLS, Point cloud, 3D Model, Heritage

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Paula Redweik, pela oportunidade de realização deste projecto sob a sua orientação e por todo o acompanhamento, disponibilidade, conhecimento transmitido, amizade e apoio prestados.

À Doutora Ana Pagará, Directora do Mosteiro de Alcobaça, pelo apoio prestado, pela simpatia e pelo entusiasmo.

Ao Manuel Sánchez Fernández pela oportunidade em participar na execução do levantamento por *laser scanning* do Mosteiro de Alcobaça e por todo o esclarecimento a este associado.

Ao meu namorado Nuno Paixão, ouvinte atento de todos os meus desassossegos, dúvidas e esmorecimentos, por todo o carinho, companheirismo, força, incentivo e, sobretudo, por todo o apoio e paciência.

Aos meus pais e irmãos por todo o apoio, força e carinho demonstrados ao longo do meu percurso académico.

Aos meus amigos que, de forma directa ou indirecta, me acompanharam ao longo do meu percurso académico e contribuíram para o meu sucesso, pela paciência, companheirismo e apoio nos mais diversos momentos.

ÍNDICE

RESUMO	v
ABSTRACT	vii
AGRADECIMENTOS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xix
ACRÓNIMOS	xxi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento do Projecto	1
1.2 Enquadramento do Objecto de Estudo	2
1.3 Objectivos	6
1.4 Estrutura do Documento	6
2. ESTADO DA ARTE	8
3. CONTEXTO HISTÓRICO E ARQUITECTÓNICO	11
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
4.1 Laser Scanning Terrestre	17
4.1.1 Princípio de funcionamento do LiDAR Terrestre	17
4.1.2 TLS Fotogramétrico	20
4.2 Fotogrametria Terrestre	20
4.2.1 Origens da Fotogrametria Digital	20
4.2.2 Restituição Múltipla Automática	21
4.2.3 Ortorrectificação digital – Ortofotos/Ortomosaicos	22
5. METODOLOGIA	23
5.1 Laser Scanning Terrestre	23
5.2 Fotogrametria – Restituição Múltipla Automática	29
6. PROCESSAMENTO DOS DADOS	33
6.1 Laser Scanning Terrestre	33
6.1.1 Pré-processamento dos dados	33
6.1.2 Processamento dos dados	35
6.2 Fotogrametria – Restituição Múltipla Automática	41
6.2.1 Pré-processamento dos dados (Processo inicial)	41
6.2.2 Processamento dos dados (Geração da nuvem de pontos)	42
7. RESULTADOS	43

7.1 Laser Scanning Terrestre	43
7.1.1 <i>Claustro de D. Dinis</i>	43
7.1.1.1 Orto-imagens (Projecções ortogonais)	43
7.1.1.2 Cortes	44
7.1.1.3 Superfícies 3D	47
7.1.1.4 Curvas de nível	49
7.1.1.5 Modelos digitais de superfície normalizados (nDSM)	50
7.1.2 <i>Igreja do Mosteiro de Alcobaça</i>	50
7.1.2.1 Cortes	50
7.1.2.2 Medições	58
7.1.2.3 Orto-imagens (Projecções ortogonais)	69
7.1.3 <i>Sacristia Nova e Capela Relicário</i>	73
7.1.3.1 Cortes	73
7.1.3.2 Modelos 3D	74
7.1.3.3 Unroll - Planificação da Capela Relicário	75
7.2 Fotogrametria – Restituição Múltipla Automática	76
7.2.1 <i>Modelos 3D dos Túmulos</i>	76
7.2.2 <i>Ortomosaicos dos Túmulos</i>	77
7.2.3 <i>Holograma do Túmulo de D. Inês de Castro</i>	78
8. DIFICULDADES E PERSPECTIVAS FUTURAS	79
9. CONCLUSÃO	80
REFERÊNCIAS	81
ANEXOS	85
ANEXO A – Orto-imagens do exterior do Claustro de D. Dinis	86
ANEXO B – Orto-imagens do interior do Claustro de D. Dinis	88
ANEXO C – Cortes longitudinais para o Claustro de D. Dinis	90
ANEXO D – Cortes transversais para o Claustro de D. Dinis	92
ANEXO E – Superfícies 3D das abóbadas do Claustro de D. Dinis (ou Claustro do Silêncio) e respectivas curvas de nível	109
ANEXO F – Cortes longitudinais para a Igreja do Mosteiro de Alcobaça	125
ANEXO G – Cortes transversais para a Igreja do Mosteiro de Alcobaça	129
ANEXO H – Cortes em planta para a igreja do Mosteiro de Alcobaça	139
ANEXO I – Cortes longitudinais e transversais da Sacristia Nova e da Capela Relicário	144
ANEXO J – Modelos 3D dos Túmulos de D. Pedro I e D. Inês de Castro	147

ANEXO K – Relatórios de Qualidade da Restituição Múltipla Automática realizada para os túmulos D. Pedro I e D. Inês de Castro no <i>software Pix4D</i>	149
---	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – MAPA DA LOCALIZAÇÃO DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	2
FIGURA 2 – MOSTEIRO DE ALCobaça ACTUALMENTE.	3
FIGURA 3 – PLANTA DA ABADIA DE ALCobaça SEGUNDO O ESTUDO DO PROF. ERNESTO KORRODI (ARQUIVO DGPC).	3
FIGURA 4 – IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	4
FIGURA 5 – CLAUSTRO DE D. DINIS NO ANDAR SUPERIOR.	4
FIGURA 6 – SACRISTIA NOVA.	4
FIGURA 7 – CAPELA RELICÁRIO.	4
FIGURA 8 – TÚMULO DE D. INÊS DE CASTRO (BRAÇO NORTE DO TRANSEPTO DA IGREJA).	5
FIGURA 9 – TÚMULO DE D. PEDRO I (BRAÇO SUL DO TRANSEPTO DA IGREJA)	5
FIGURA 10 – ESTÁTUA QUE SUPORTA O TÚMULO DE D. INÊS DE CASTRO.	5
FIGURA 11 – ESTÁTUA QUE SUPORTA O TÚMULO DE D. PEDRO I.	5
FIGURA 12 – FRONTARIA DO MOSTEIRO DE ALCobaça NOS ANOS 30-40 DO SÉCULO XX.	11
FIGURA 13 – INTERIOR DA CASA DO LAVABO DA ABADIA DE ALCobaça.	12
FIGURA 14 – REDE HIDRÁULICA MEDIEVAL DA ABADIA DE ALCobaça.	12
FIGURA 15 – PLANTAS DAS IGREJAS DAS ABADIAS DE CLARAVAL III (ESQUERDA) E DE ALCobaça (DIREITA).	12
FIGURA 16 – CLAUSTRO DE D. DINIS POSSIVELMENTE NO SÉCULO XIX.	13
FIGURA 17 – CLAUSTRO DE D. DINIS ACTUAL.	13
FIGURA 18 – CAPELA-MOR DO MOSTEIRO DE ALCobaça NO PERÍODO BARROCO.	13
FIGURA 19 – CAPELA-MOR DO MOSTEIRO DE ALCobaça NO PERÍODO ACTUAL.	13
FIGURA 20 – TÚMULOS DE D. PEDRO I E D. INÊS DE CASTRO NO PANTEÃO RÉGIO.	14
FIGURA 21 – PLANTA MEDIEVAL (RECONSTITUIÇÃO) DA ABADIA DE ALCobaça, NO TRAÇADO MODULAR.	15
FIGURA 22 – PLANTA MEDIEVAL DA IGREJA DA ABADIA DE ALCobaça (RECONSTITUIÇÃO) NO TRAÇADO MODULAR.	15
FIGURA 23 – PLANTA DA IGREJA DE ALCobaça I (PRETO) E ALCobaça II (VERMELHO) SEGUNDO M. COCHERIL.	16
FIGURA 24 – DEFLEXÃO DO LASER – LASER SCANNER FARO FOCUS^{3D} X330.	17
FIGURA 25 – COORDENAÇÃO DE UM PONTO MEDIDO POR LASER SCANNING (COORDENADAS ESFÉRICAS).	18
FIGURA 26 – REPRESENTAÇÃO BÁSICA DO PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO DO LASER SCANNER BASEADO NA DIFERENÇA DE FASE.	18
FIGURA 27 – REPRESENTAÇÃO DO FOV (ESQUERDA) E DA ABERTURA (DIREITA) DO LASER SCANNING UTILIZADO.	19
FIGURA 28 – LEVANTAMENTO DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	24
FIGURA 29 – FARO FOCUS^{3D} X 330 LASER SCANNER.	24
FIGURA 30 – PARÂMETROS DE RESOLUÇÃO ADOPTADOS NO LEVANTAMENTO.	24
FIGURA 31 – EXEMPLO DE VISUALIZAÇÃO DE UM SCAN OBTIDO NO LEVANTAMENTO COM LASER SCANNER.	25
FIGURA 32 – ALVO ESFÉRICO DE DIÂMETRO DE 14.5 CM USADO NO LEVANTAMENTO.	25
FIGURA 33 – ALVO ESFÉRICO DE DIÂMETRO DE 25 CM USADO NO LEVANTAMENTO.	25
FIGURA 34 – PERCURSO REALIZADO PARA O LEVANTAMENTO DE ALGUMAS DEPENDÊNCIAS DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	26
FIGURA 35 – NUVEM DE PONTOS COLORIDA DO MOSTEIRO DE ALCobaça OBTIDA POR APLICAÇÃO DO TLS.	26
FIGURA 36 – LEVANTAMENTOS DA CAPELA RELICÁRIO (PROJECTO ISOLADO) A DIFERENTES ALTURAS E POSIÇÕES (SÍMBOLOS DO LASER SCANNER).	27
FIGURA 37 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA ADOPTADA PARA O TLS.	28
FIGURA 38 – CÂMARA FOTOGRÁFICA DIGITAL SONY ALPHA DSLR-A230.	29
FIGURA 39 – DISPOSIÇÃO DOS PONTOS ESTAÇÃO NA TOMADA DE FOTOS DOS TÚMULOS.	30

FIGURA 40 – EXEMPLIFICAÇÃO DAS DIFERENTES FIADAS REALIZADAS NA TOMADA DE FOTOS, EM TORNO DOS TÚMULOS DE D. PEDRO I E D. INÊS DE CASTRO.	30
FIGURA 41 – AQUISIÇÃO FOTOGRÁFICA COM RECURSO A UM ESCADOTE E TRIPÉ EM MÁXIMA EXTENSÃO.....	31
FIGURA 42 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA ADOPTADA PARA A TÉCNICA DE RESTITUIÇÃO MÚLTIPLA AUTOMÁTICA.	32
FIGURA 43 – EXEMPLO DE UM PLANO DE REFERÊNCIA (RETICULADO VERDE) DESENHADO EM DUAS NUVENS DE PONTOS.	33
FIGURA 44 – ERRO MÁXIMO DE REGISTO DE NUVENS DE PONTOS OBTIDO.	34
FIGURA 45 – NUVENS DE PONTOS DO MOSTEIRO DE ALCOBAÇA OBTIDAS POR APLICAÇÃO DO TLS (CADA COR CORRESPONDE A UM SCAN).	34
FIGURA 46 – EXEMPLO DE EDIÇÃO NA NUVEM DE PONTOS: A) NUVEM ORIGINAL; B) E C) ZONA SELECIONADA E ELIMINADA; D) NUVEM EDITADA.	35
FIGURA 47 – EXEMPLO DOS PONTOS CONSIDERADOS NUM SCAN DO CLAUSTRO DE D. DINIS: A) SCAN COMPLETO; B) PARTE APROVEITADA A ROSA.....	36
FIGURA 48 – EXEMPLO DE UMA <i>CLIPPING BOX</i> COM VISTA À OBTENÇÃO DE UM CORTE EM PLANTA DA IGREJA.	36
FIGURA 49 – ORIENTAÇÃO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCOBAÇA NUM REFERENCIAL X,Y,Z.	37
FIGURA 50 – EXEMPLO DE UMA ORTO-IMAGEM COM VISTA DE TOPO (XY) E COM TAMANHO DO <i>PIXEL</i> DE 0.05 M PELA ALTURA DAS MÍSULAS PIRAMIDAIAS.	37
FIGURA 51 – EXEMPLO DE RECONSTRUÇÃO DE UM ELEMENTO DA NUVEM DE PONTOS DA SACRISTIA NOVA POR REPLICAÇÃO E SIMETRIA DE UMA FRACÇÃO RESPECTIVA: A) FRACÇÃO DO ELEMENTO A REPLICAR; B) OPERAÇÃO DE SIMETRIA DA FRACÇÃO DO ELEMENTO; C) UNIÃO COM A RESTANTE NUVEM DO ELEMENTO.....	38
FIGURA 52 – EXEMPLO DE UM ELEMENTO DA NUVEM DE PONTOS DA SACRISTIA NOVA A SER COMPLETADO POR OPERAÇÕES DE REPLICAÇÃO, SIMETRIA, TRANSLAÇÃO E ROTAÇÃO DE UMA FRACÇÃO RESPECTIVA: A) IDENTIFICAÇÃO DA FRACÇÃO DO ELEMENTO A REPLICAR; B) FRACÇÃO DO ELEMENTO A REPLICAR, APLICADO UMA OPERAÇÃO DE SIMETRIA; C) FRACÇÃO DO ELEMENTO SIMÉTRICA; D) RESULTADO – ELEMENTO COMPLETO ATRAVÉS DE OPERAÇÕES DE TRANSLAÇÃO E ROTAÇÃO DA FRACÇÃO SIMÉTRICA.....	38
FIGURA 53 – NUVEM DE PONTOS RELATIVA À ABÓBADA 21 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVA <i>MESH</i> GERADA: A) NUVEM DE PONTOS INICIAL DO TRAMO; B) EDIÇÃO DA NUVEM DE PONTOS INICIAL COM VISTA À OBTENÇÃO DA ABÓBADA (DESDE AS MÍSULAS); C) NUVEM DE PONTOS FINAL; D) <i>MESH</i> RUGOSA; E) <i>MESH</i> REFINADA; F) <i>MESH</i> COLORIDA; G) IDENTIFICAÇÃO DA <i>MESH</i> DA ABÓBADA GERADA.	39
FIGURA 54 – MÉTODO DE CONSTRUÇÃO DO MODELO 3D DA CAPELA RELICÁRIO: A) E E) NUVEM DE PONTOS; B) E G) <i>MESH</i> REFINADA; C) SUPERFÍCIE GERADA PARA COMPLETUDE E UNIÃO DA <i>MESH</i> A PARTIR DOS CONTORNOS DO OBJECTO; D) E H) <i>MESH</i> COLORIDA; F) <i>MESH</i> RUGOSA (INICIAL); I) <i>MESH</i> COMPLETA COLORIDA.....	40
FIGURA 55 – MÉTODO DE CONSTRUÇÃO DO MODELO 3D DA SACRISTIA NOVA: A) E B) NUVEM DE PONTOS; C) E D) <i>MESH</i> 3D RUGOSA (INICIAL); E) <i>MESH</i> 3D REFINADA; F) <i>MESH</i> 3D REFINADA COM SUPERFÍCIE EM FALTA; G) SUPERFÍCIE GERADA PARA COMPLETUDE E UNIÃO DAS <i>MESHES</i> A PARTIR DOS CONTORNOS DOS OBJECTOS.	40
FIGURA 56 – RESULTADO DA TRIANGULAÇÃO DAS FOTOGRAFIAS DO TÚMULO DE D. PEDRO I COM REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS ESTAÇÃO.....	41
FIGURA 57 – RESULTADO DA TRIANGULAÇÃO DAS FOTOGRAFIAS DO TÚMULO DE D. INÊS DE CASTRO COM REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS ESTAÇÃO.	41
FIGURA 58 – NUVEM DE PONTOS GERADA PARA O TÚMULO DE D. PEDRO I.	42
FIGURA 59 – NUVEM DE PONTOS GERADA PARA O TÚMULO DE D. INÊS DE CASTRO.....	42
FIGURA 60 – NUVEM DE PONTOS DO TÚMULO DE D. PEDRO I APÓS EDIÇÃO.	42
FIGURA 61 – NUVEM DE PONTOS DO TÚMULO DE D. INÊS DE CASTRO APÓS EDIÇÃO.....	42
FIGURA 62 – PROECÇÃO ORTOGONAL DO EXTERIOR DO CLAUSTRO ESTE DE D. DINIS.	43
FIGURA 63 – DEMONSTRAÇÃO DA EXPOSIÇÃO DAS ORTO-IMAGENS GERADAS PARA AS FACHADAS DO CLAUSTRO DE D. DINIS.	44
FIGURA 64 – PROECÇÃO ORTOGONAL DO INTERIOR DO CLAUSTRO NORTE DE D. DINIS.....	44
FIGURA 65 – DEMONSTRAÇÃO DA REALIZAÇÃO DOS CORTES LONGITUDINAIS NO CLAUSTRO DE D. DINIS.	45
FIGURA 66 – CORTES LONGITUDINAIS ENTRE A SEGUNDA E PENÚLTIMA ABÓBADAS (AZUL) E ENTRE A PRIMEIRA E ÚLTIMA ABÓBADAS (VERDE) DO CLAUSTRO NORTE DE D. DINIS.....	46
FIGURA 67 – IDENTIFICAÇÃO DOS CORTES REALIZADOS AO LONGO DE CADA ARCO ENTRE TRAMO.....	46

FIGURA 68 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 2-3 DO CLAUSTRO ESTE DE D. DINIS.	47
FIGURA 69 – IDENTIFICAÇÃO DAS ABÓBADAS DO CLAUSTRO DE D. DINIS.	48
FIGURA 70 – SUPERFÍCIE 3D GERADA PARA A ABÓBADA 21 DO CLAUSTRO DE D. DINIS.	48
FIGURA 71 – SUPERFÍCIES 3D GERADAS PARA AS ABÓBADAS DO CLAUSTRO DE D. DINIS.	49
FIGURA 72 – CURVAS DE NÍVEL GERADAS A PARTIR DA SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 21 DO CLAUSTRO DE D. DINIS.	49
FIGURA 73 – NDSM DAS ABÓBADAS DO CLAUSTRO DE D. DINIS, COM COTAS OBTIDAS A PARTIR DE UMA REFERÊNCIA ARBITRÁRIA. .	50
FIGURA 74 – IDENTIFICAÇÃO DOS CORTES LONGITUDINAIS REALIZADOS PARA A IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	51
FIGURA 75 – IDENTIFICAÇÃO DOS CORTES LONGITUDINAIS PARCIAIS REALIZADOS PARA A IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	51
FIGURA 76 – CORTE LONGITUDINAL NA NAVE CENTRAL DA IGREJA (L3) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	52
FIGURA 77 – CONCATENAÇÃO DOS CORTES LONGITUDINAIS PARCIAIS REALIZADOS POR CADA DUAS ABÓBADAS DA NAVE CENTRAL DA IGREJA (CORTES PARCIAIS L3) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	52
FIGURA 78 – CORTES LONGITUDINAIS PARCIAIS REALIZADOS POR CADA DUAS ABÓBADAS DA NAVE CENTRAL DA IGREJA (CORTES PARCIAIS L3_1 E L3_4) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	52
FIGURA 79 – IDENTIFICAÇÃO DOS CORTES TRANSVERSAIS REALIZADOS PARA A IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	53
FIGURA 80 – CORTE TRANSVERSAL T6 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	53
FIGURA 81 – CORTE TRANSVERSAL ENTRE PILARES T6_C COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	54
FIGURA 82 – DEMONSTRAÇÃO DO CORTE EM PLANTA PELA BASE DOS PILARES DA CABECEIRA DA IGREJA.	54
FIGURA 83 – CORTE EM PLANTA PELA BASE DOS PILARES DA CABECEIRA DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	55
FIGURA 84 – DEMONSTRAÇÃO DO CORTE EM PLANTA PELA BASE DAS MÍSLAS PIRAMIDAIIS DOS PILARES DA IGREJA.	55
FIGURA 85 – CORTE EM PLANTA PELA BASE DAS MÍSLAS PIRAMIDAIIS DOS PILARES DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	55
FIGURA 86 – DEMONSTRAÇÃO DO CORTE EM PLANTA PELA ALTURA DAS MÍSLAS PIRAMIDAIIS DOS PILARES DA IGREJA.	56
FIGURA 87 – CORTE EM PLANTA PELA ALTURA DAS MÍSLAS PIRAMIDAIIS DOS PILARES DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	56
FIGURA 88 – DEMONSTRAÇÃO DO CORTE EM PLANTA PELA BASE DAS JANELAS.	56
FIGURA 89 – CORTE EM PLANTA PELA BASE DAS JANELAS SUL DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	57
FIGURA 90 – DEMONSTRAÇÃO DO CORTE EM PLANTA PELA BASE DAS ABÓBADAS.	57
FIGURA 91 – CORTE EM PLANTA PELA BASE DAS ABÓBADAS DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	57
FIGURA 92 – ESBOÇO DE MEDIÇÕES REALIZADAS PARA OS CORTES L2 E L4 DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	59
FIGURA 93 – ESBOÇO DE MEDIÇÕES REALIZADAS PARA O CORTE L3 DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	59
FIGURA 94 – DESNÍVEL EXISTENTE ENTRE OS CORTES LONGITUDINAIS L2 E L4.	60
FIGURA 95 – ESBOÇO DE MEDIÇÕES REALIZADAS PARA OS CORTES L10 E L11 DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	60
FIGURA 96 – ESBOÇO DE MEDIÇÕES (ALTURAS) REALIZADAS PARA OS CORTES T2 E T3 DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	61
FIGURA 97 – EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	62
FIGURA 98 – ESBOÇO DE MEDIÇÕES (LARGURAS E COMPRIMENTO) REALIZADAS PARA OS CORTES T2 E T3 DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	63
FIGURA 99 – ESBOÇO DE MEDIÇÕES (ALTURAS) REALIZADAS PARA OS CORTES T4 A T15 DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	64
FIGURA 100 – ESBOÇO DE MEDIÇÕES (LARGURAS) REALIZADAS PARA OS CORTES T4 A T15 DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	65
FIGURA 101 – ESBOÇO DE MEDIÇÕES (ALTURAS) REALIZADAS PARA OS CORTES T6C, T11C E T13C DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	66
FIGURA 102 – ESBOÇO DE MEDIÇÕES (LARGURAS) REALIZADAS PARA OS CORTES T6C, T11C E T13C DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	66
FIGURA 103 – PROJEÇÃO ORTOGONAL VERTICAL DA CABECEIRA DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça VISTA NO SENTIDO OESTE-ESTE (T1).	69
FIGURA 104 – PROJEÇÃO ORTOGONAL DA FACHADA EXTERIOR NORTE DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça (L1) VISTA NO SENTIDO ESTE-OESTE.	69
FIGURA 105 – PROJEÇÃO ORTOGONAL DA FACHADA EXTERIOR SUL DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça (L5) VISTA NO SENTIDO OESTE-ESTE.	69
FIGURA 106 – MEDIÇÕES REALIZADAS SOBRE A ORTO-IMAGEM DO CORTE EM PLANTA (PELA BASE DAS MÍSLAS) DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça (1).	70

FIGURA 107 – MEDIÇÕES REALIZADAS SOBRE A ORTO-IMAGEM DO CORTE EM PLANTA (PELA BASE DAS MÍSULAS) DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCOBAÇA (2).	70
FIGURA 108 – DETERMINAÇÃO DO CENTRO DOS PILARES COM VISTA À OBTENÇÃO DAS MEDIÇÕES AXIAIS.	71
FIGURA 109 – LOCAL SELECIONADO PARA A REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES.	71
FIGURA 110 – IDENTIFICAÇÃO DOS CORTES REALIZADOS PARA A SACRISTIA NOVA E CAPELA RELICÁRIO DO MOSTEIRO DE ALCOBAÇA.	73
FIGURA 111 – CORTE LONGITUDINAL (A) OBTIDO PARA A SACRISTIA NOVA E CAPELA RELICÁRIO DO MOSTEIRO DE ALCOBAÇA.	73
FIGURA 112 – ESQUEMA DE LOCALIZAÇÃO DOS CORTES TRANSVERSAIS OBTIDOS PARA A SACRISTIA NOVA E CAPELA RELICÁRIO DO MOSTEIRO DE ALCOBAÇA.	74
FIGURA 113 – MODELO 3D DA SACRISTIA NOVA GERADO A PARTIR DA NUVEM DE PONTOS DO LEVANTAMENTO DA IGREJA: A) MODELO 3D; B) TECTO DO MODELO 3D; C) PAVIMENTO DO MODELO 3D; D) LADO ESQUERDO DO MODELO 3D EM (A); LADO DIREITO DO MODELO 3D EM (A).	75
FIGURA 114 – MODELO 3D DA CAPELA RELICÁRIO GERADO A PARTIR DA NUVEM DE PONTOS (PROJECTO INDEPENDENTE).	75
FIGURA 115 – PLANIFICAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS DA CAPELA RELICÁRIO.	76
FIGURA 116 – MODELOS 3D DOS TÚMULOS DE D. PEDRO I (ESQUERDA) E DE D. INÊS DE CASTRO (DIREITA).	76
FIGURA 117 – PORMENOR DO MODELO 3D DO TÚMULO DE D. PEDRO I.	77
FIGURA 118 – PORMENOR DO MODELO 3D DO TÚMULO DE D. INÊS DE CASTRO.	77
FIGURA 119 – ORTOMOSAICOS DAS QUATRO FACES LATERAIS DO TÚMULO DE D. PEDRO I.	77
FIGURA 120 – ORTOMOSAICOS DAS QUATRO FACES LATERAIS DO TÚMULO DE D. INÊS DE CASTRO.	78
FIGURA 121 – HOLOGRAMA DO TÚMULO DE D. INÊS DE CASTRO A PARTIR DE UM SMARTPHONE.	78
FIGURA 122 – HOLOGRAMA DO TÚMULO DE D. INÊS DE CASTRO A PARTIR DE UM ECRÃ LCD.	78
FIGURA 123 – PROECÇÃO ORTOGONAL DO EXTERIOR DO CLAUSTRO NORTE DE D. DINIS.	86
FIGURA 124 – PROECÇÃO ORTOGONAL DO EXTERIOR DO CLAUSTRO OESTE DE D. DINIS.	86
FIGURA 125 – PROECÇÃO ORTOGONAL DO EXTERIOR DO CLAUSTRO SUL DE D. DINIS.	86
FIGURA 126 – PROECÇÃO ORTOGONAL DO EXTERIOR DO CLAUSTRO ESTE DE D. DINIS.	87
FIGURA 127 – PROECÇÃO ORTOGONAL DO INTERIOR DO CLAUSTRO NORTE DE D. DINIS.	88
FIGURA 128 – PROECÇÃO ORTOGONAL DO INTERIOR DO CLAUSTRO OESTE DE D. DINIS.	88
FIGURA 129 – PROECÇÃO ORTOGONAL DO INTERIOR DO CLAUSTRO SUL DE D. DINIS.	89
FIGURA 130 – PROECÇÃO ORTOGONAL DO INTERIOR DO CLAUSTRO ESTE DE D. DINIS.	89
FIGURA 131 – CORTES LONGITUDINAIS ENTRE A PRIMEIRA E ÚLTIMA ABÓBADAS (VERDE) E ENTRE A SEGUNDA E PENÚLTIMA ABÓBADAS (AZUL) DO CLAUSTRO NORTE DE D. DINIS.	90
FIGURA 132 – CORTES LONGITUDINAIS ENTRE A PRIMEIRA E ÚLTIMA ABÓBADAS (VERDE) E ENTRE A SEGUNDA E PENÚLTIMA ABÓBADAS (AZUL) DO CLAUSTRO OESTE DE D. DINIS.	90
FIGURA 133 – CORTES LONGITUDINAIS ENTRE A PRIMEIRA E ÚLTIMA ABÓBADAS (VERDE) E ENTRE A SEGUNDA E PENÚLTIMA ABÓBADAS (AZUL) DO CLAUSTRO SUL DE D. DINIS.	91
FIGURA 134 – CORTES LONGITUDINAIS ENTRE A PRIMEIRA E ÚLTIMA ABÓBADAS (VERDE) E ENTRE A SEGUNDA E PENÚLTIMA ABÓBADAS (AZUL) DO CLAUSTRO ESTE DE D. DINIS.	91
FIGURA 135 – IDENTIFICAÇÃO DOS CORTES REALIZADOS AO LONGO DE CADA ARCO ENTRE TRAMO.	92
FIGURA 136 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 1-2 DO CLAUSTRO NORTE DE D. DINIS.	92
FIGURA 137 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 2-3 DO CLAUSTRO NORTE DE D. DINIS.	93
FIGURA 138 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 3-4 DO CLAUSTRO NORTE DE D. DINIS.	93
FIGURA 139 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 4-5 DO CLAUSTRO NORTE DE D. DINIS.	94
FIGURA 140 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 5-6 DO CLAUSTRO NORTE DE D. DINIS.	94
FIGURA 141 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 6-7 DO CLAUSTRO NORTE DE D. DINIS.	95
FIGURA 142 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 7-8 DO CLAUSTRO NORTE DE D. DINIS.	95
FIGURA 143 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 1-2 DO CLAUSTRO OESTE DE D. DINIS.	96
FIGURA 144 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 2-3 DO CLAUSTRO OESTE DE D. DINIS.	96
FIGURA 145 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 3-4 DO CLAUSTRO OESTE DE D. DINIS.	97
FIGURA 146 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 4-5 DO CLAUSTRO OESTE DE D. DINIS.	97

FIGURA 147 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 5-6 DO CLAUSTRO OESTE DE D. DINIS.	98
FIGURA 148 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 6-7 DO CLAUSTRO OESTE DE D. DINIS.	98
FIGURA 149 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 7-8 DO CLAUSTRO OESTE DE D. DINIS.	99
FIGURA 150 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 8-9 DO CLAUSTRO OESTE DE D. DINIS.	99
FIGURA 151 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 1-2 DO CLAUSTRO SUL DE D. DINIS.	100
FIGURA 152 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 2-3 DO CLAUSTRO SUL DE D. DINIS.	100
FIGURA 153 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 3-4 DO CLAUSTRO SUL DE D. DINIS.	101
FIGURA 154 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 4-5 DO CLAUSTRO SUL DE D. DINIS.	101
FIGURA 155 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 5-6 DO CLAUSTRO SUL DE D. DINIS.	102
FIGURA 156 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 6-7 DO CLAUSTRO SUL DE D. DINIS.	102
FIGURA 157 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 7-8 DO CLAUSTRO SUL DE D. DINIS.	103
FIGURA 158 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 8-9 DO CLAUSTRO SUL DE D. DINIS.	103
FIGURA 159 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 9-10 DO CLAUSTRO SUL DE D. DINIS.	104
FIGURA 160 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 1-2 DO CLAUSTRO ESTE DE D. DINIS.	104
FIGURA 161 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 2-3 DO CLAUSTRO ESTE DE D. DINIS.	105
FIGURA 162 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 3-4 DO CLAUSTRO ESTE DE D. DINIS.	105
FIGURA 163 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 4-5 DO CLAUSTRO ESTE DE D. DINIS.	106
FIGURA 164 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 5-6 DO CLAUSTRO ESTE DE D. DINIS.	106
FIGURA 165 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 6-7 DO CLAUSTRO ESTE DE D. DINIS.	107
FIGURA 166 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 7-8 DO CLAUSTRO ESTE DE D. DINIS.	107
FIGURA 167 – CORTE TRANSVERSAL DO ARCO 8-9 DO CLAUSTRO ESTE DE D. DINIS.	108
FIGURA 168 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 1 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	109
FIGURA 169 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 2 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	109
FIGURA 170 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 3 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	110
FIGURA 171 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 4 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	110
FIGURA 172 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 5 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	111
FIGURA 173 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 6 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	111
FIGURA 174 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 7 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	112
FIGURA 175 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 8 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	112
FIGURA 176 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 9 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	113
FIGURA 177 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 10 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	113
FIGURA 178 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 11 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	114
FIGURA 179 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 12 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	114
FIGURA 180 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 13 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	115
FIGURA 181 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 14 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	115
FIGURA 182 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 15 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	116
FIGURA 183 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 16 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	116
FIGURA 184 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 17 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	117
FIGURA 185 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 18 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	117
FIGURA 186 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 19 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	118
FIGURA 187 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 20 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	118
FIGURA 188 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 21 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	119
FIGURA 189 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 22 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	119
FIGURA 190 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 23 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	120
FIGURA 191 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 24 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	120
FIGURA 192 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 25 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	121
FIGURA 193 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 26 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	121
FIGURA 194 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 27 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	122
FIGURA 195 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 28 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	122

FIGURA 196 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 29 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	123
FIGURA 197 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 30 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	123
FIGURA 198 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 31 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	124
FIGURA 199 – SUPERFÍCIE 3D DA ABÓBADA 32 DO CLAUSTRO DE D. DINIS E RESPECTIVAS CURVAS DE NÍVEL.	124
FIGURA 200 – IDENTIFICAÇÃO DOS CORTES LONGITUDINAIS REALIZADOS PARA A IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	125
FIGURA 201 – IDENTIFICAÇÃO DOS CORTES LONGITUDINAIS PARCIAIS REALIZADOS PARA A IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	125
FIGURA 202 – PROJECCÃO ORTOGONAL DA FACHADA EXTERIOR NORTE DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça (L1) VISTA NO SENTIDO ESTE-OESTE.	125
FIGURA 203 – CORTE LONGITUDINAL NA NAVE NORTE DA IGREJA (L2) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	126
FIGURA 204 – CONCATENAÇÃO DOS CORTES LONGITUDINAIS PARCIAIS REALIZADOS POR CADA DUAS ABÓBADAS DA NAVE NORTE DA IGREJA (CORTES PARCIAIS L2) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	126
FIGURA 205 – CORTE LONGITUDINAL NA NAVE CENTRAL DA IGREJA (L3) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	126
FIGURA 206 – CONCATENAÇÃO DOS CORTES LONGITUDINAIS PARCIAIS REALIZADOS POR CADA DUAS ABÓBADAS DA NAVE CENTRAL DA IGREJA (CORTES PARCIAIS L3) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	126
FIGURA 207 – CORTE LONGITUDINAL NA NAVE SUL DA IGREJA (L4) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	127
FIGURA 208 – CONCATENAÇÃO DOS CORTES LONGITUDINAIS PARCIAIS REALIZADOS POR CADA DUAS ABÓBADAS DA NAVE SUL DA IGREJA (CORTES PARCIAIS L4) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	127
FIGURA 209 – PROJECCÃO ORTOGONAL DA FACHADA EXTERIOR SUL DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça (L5) VISTA NO SENTIDO OESTE-ESTE.	127
FIGURA 210 – CORTE LONGITUDINAL NO BRAÇO NORTE DA IGREJA (L6) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	127
FIGURA 211 – CORTE LONGITUDINAL NO BRAÇO NORTE DA IGREJA (L7) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	127
FIGURA 212 – CORTE LONGITUDINAL NO BRAÇO SUL DA IGREJA (L8) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	128
FIGURA 213 – CORTE LONGITUDINAL NO BRAÇO SUL DA IGREJA (L9) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	128
FIGURA 214 – CORTE LONGITUDINAL QUE INTERSECTA O CENTRO DOS PILARES QUE SEPARAM AS NAVES NORTE E CENTRAL DA IGREJA (L10) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	128
FIGURA 215 – CORTE LONGITUDINAL QUE INTERSECTA O CENTRO DOS PILARES QUE SEPARAM AS NAVES CENTRAL E SUL DA IGREJA (L11) DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	128
FIGURA 216 – IDENTIFICAÇÃO DOS CORTES TRANSVERSAIS REALIZADOS PARA A IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	129
FIGURA 217 – PROJECCÃO ORTOGONAL VERTICAL DA CABECEIRA DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça VISTA NO SENTIDO OESTE-ESTE (T1).	129
FIGURA 218 – CORTE TRANSVERSAL T2 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	130
FIGURA 219 – CORTE TRANSVERSAL T3 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	130
FIGURA 220 – CORTE TRANSVERSAL T4 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	131
FIGURA 221 – CORTE TRANSVERSAL T5 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	131
FIGURA 222 – CORTE TRANSVERSAL T6 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	132
FIGURA 223 – CORTE TRANSVERSAL ENTRE PILARES T6_C COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	132
FIGURA 224 – CORTE TRANSVERSAL T7 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	133
FIGURA 225 – CORTE TRANSVERSAL T8 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	133
FIGURA 226 – CORTE TRANSVERSAL T9 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	134
FIGURA 227 – CORTE TRANSVERSAL T10 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	134
FIGURA 228 – CORTE TRANSVERSAL T11 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	135
FIGURA 229 – CORTE TRANSVERSAL ENTRE PILARES T11_C COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	135
FIGURA 230 – CORTE TRANSVERSAL T12 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	136
FIGURA 231 – CORTE TRANSVERSAL T13 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	136
FIGURA 232 – CORTE TRANSVERSAL ENTRE PILARES T13_C COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	137
FIGURA 233 – CORTE TRANSVERSAL T14 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	137
FIGURA 234 – CORTE TRANSVERSAL T15 COM EXTRADORSO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	138
FIGURA 235 – CORTE EM PLANTA PELA BASE DOS PILARES DA CABECEIRA DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	139
FIGURA 236 – CORTE EM PLANTA PELA BASE DAS MÍSLAS PIRAMIDAIAS DOS PILARES DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	139

FIGURA 237 – CORTE EM PLANTA PELA ALTURA DAS MÍSLAS PIRAMIDAIAS DOS PILARES DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça...	140
FIGURA 238 – CORTE EM PLANTA PELA BASE DAS JANELAS SUL DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.....	140
FIGURA 239 – CORTE EM PLANTA PELA BASE DAS ABÓBADAS DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	141
FIGURA 240 – MEDIÇÕES REALIZADAS SOBRE A ORTO-IMAGEM DO CORTE EM PLANTA (PELA BASE DAS MÍSLAS) DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça (1).	142
FIGURA 241 – MEDIÇÕES REALIZADAS SOBRE A ORTO-IMAGEM DO CORTE EM PLANTA (PELA BASE DAS MÍSLAS) DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça (2).	143
FIGURA 242 – IDENTIFICAÇÃO DOS CORTES REALIZADOS PARA A SACRISTIA NOVA E CAPELA RELICÁRIO DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	144
FIGURA 243 – CORTE LONGITUDINAL (A) OBTIDO PARA A SACRISTIA NOVA E CAPELA RELICÁRIO DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	144
FIGURA 244 – CORTE TRANSVERSAL (B) OBTIDO PARA A CAPELA RELICÁRIO DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	145
FIGURA 245 – CORTE TRANSVERSAL (C) OBTIDO PARA A SACRISTIA NOVA E CAPELA RELICÁRIO DO MOSTEIRO DE ALCobaça.....	145
FIGURA 246 – CORTE TRANSVERSAL (D) OBTIDO PARA A SACRISTIA NOVA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	146
FIGURA 247 – CORTE TRANSVERSAL (E) OBTIDO PARA A SACRISTIA NOVA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	146
FIGURA 248 – MODELO 3D GERADO PARA O TÚMULO DE D. PEDRO I SOB DIFERENTES PERSPECTIVAS.	147
FIGURA 249 – MODELO 3D GERADO PARA O TÚMULO DE D. INÊS DE CASTRO SOB DIFERENTES PERSPECTIVAS.....	148

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – ESPECIFICAÇÕES DO <i>LASER SCANNER FARO FOCUS^{3D} X 330</i>	23
TABELA 2 – ESPECIFICAÇÕES DA CÂMARA FOTOGRÁFICA DIGITAL <i>SONY ALPHA DSLR-A230</i>	29
TABELA 3 – TIPOS DE MEDIÇÕES REALIZADAS POR MODELO DE CORTE.	58
TABELA 4 – MEDIÇÕES REALIZADAS PARA OS CORTES LONGITUDINAIS DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	59
TABELA 5 – MEDIÇÕES RELATIVAS AOS CORTES L10 E L11 DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.....	60
TABELA 6 – MEDIÇÕES RELATIVAS ÀS ALTURAS DAS ABÓBADAS E ESPESSURAS DO EXTRADORSO PARA OS CORTES T2 E T3 DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.....	62
TABELA 7 – MEDIÇÕES RELATIVAS ÀS LARGURAS DAS ABÓBADAS E COMPRIMENTO DO TRANSEPTO DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça PARA OS CORTES T2 E T3.....	63
TABELA 8 – MEDIÇÕES RELATIVAS ÀS ALTURAS REALIZADAS PARA OS CORTES TRANSVERSAIS T4 A T15 DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	64
TABELA 9 – MEDIÇÕES RELATIVAS ÀS LARGURAS REALIZADAS PARA OS CORTES TRANSVERSAIS T4 A T15 DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	65
TABELA 10 – MEDIÇÕES OBTIDAS PARA OS CORTES TRANSVERSAIS T6C, T11C E T13C DA IGREJA DO MOSTEIRO DE ALCobaça.	67
TABELA 11 – COMPARAÇÃO ENTRE MEDIDAS OBTIDAS NA ORTO-IMAGEM E MEDIDAS AVANÇADAS POR JORGE [2017].	72

ACRÓNIMOS

2D – Bidimensional

3D – Tridimensional

DGPC – Direcção Geral do Património Cultural

DSM – *Digital Surface Model* (Modelo Digital de Superfície)

f – Distância focal

FOV – *Field Of View*

HDR – *High Dynamic Range Imaging*

ICP – *Iterative Closest Point*

LiDAR – *Light Detection And Ranging*

nDSM – *Normalized Digital Surface Model* (Modelo Digital de Superfície normalizado)

PDI – Processamento Digital de Imagem

RGB – *Red, Green and Blue*

TLS – *Terrestrial Laser Scanning*

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do Projecto

Nos dias de hoje, o Património Cultural assume uma importância fundamental na vida das pessoas e das comunidades, como principal elemento de identidade e âncora na transmissão dos valores comuns de geração em geração [Jorge, 2017].

O Mosteiro de Alcobaça, considerado a principal casa da Ordem de Cister, construído a partir do século XII, constitui um dos principais e importantes monumentos de Portugal e do Mundo, integrando a Lista do Património Mundial da UNESCO desde 1989. Este monumento cisterciense é “reconhecido como uma obra-prima do génio criador humano e apontado como um exemplo extraordinário daquilo que foi a arquitectura e o saber tecnológico dos monges da Ordem de Cister na época medieval” [Jorge, 2017].

No entanto, pouco se conhece acerca da evolução arquitectónica e métodos construtivos desta Abadia, situada na cidade de Alcobaça, gerando por vezes discórdia entre os historiadores.

Este projecto surge como complemento e contributo à estratégia de gestão do Mosteiro de Alcobaça, que contempla a existência de uma colaboração estreita com a comunidade científica, tendo em conta a importância do conhecimento para a salvaguarda e promoção do património. Neste sentido foram adoptadas técnicas e métodos fotogramétricos (não destrutivos, isto é, que não envolvem qualquer dano ou contacto físico com o monumento ou objecto) com o intuito de se obter produtos que permitam documentar a evolução da arquitectura ao longo das várias fases de construção do Mosteiro e que sirvam de auxiliares ao nível de intervenções de conservação e restauro.

A concepção de arquivos arquitectónicos, fundamentais, especialmente, na manutenção e reparo de edifícios históricos, impulsionou o desenvolvimento de tecnologia mais robusta e precisa, possibilitando o aumento de realização de projectos de documentação patrimonial. A tecnologia de varrimento por laser, a fotogrametria de curto alcance e a combinação de ambas e/ou outras técnicas cumprem esses requisitos e têm, por isso, sido utilizados ao longo de vários anos para a concepção de arquivos arquitectónicos [Kuçak *et al.*, 2016].

A concretização deste projecto contou com a utilização da tecnologia *Laser Scanning* Terrestre (TLS), aplicada ao Mosteiro de Alcobaça, e da fotogrametria de curto alcance, aplicada aos dois principais túmulos da Igreja do Mosteiro.

O *laser scanning* terrestre é uma tecnologia recente (década de 1990) capaz de realizar levantamentos de estruturas de forma rápida e eficaz, com precisão milimétrica, através da emissão de radiação, sendo muito útil nos levantamentos tridimensionais (3D) de edifícios, em especial os de grande envergadura e de difícil acesso, como o caso da maioria dos edifícios históricos. Através dos dados obtidos por *laser* é possível representar a geometria real dos edifícios, identificar problemas estruturais, épocas de construção, diferenças nos métodos construtivos e, ainda, gerar modelos 3D.

A fotogrametria é uma técnica mais antiga que a tecnologia *laser scanning* (século XIX). A fotogrametria de curto alcance, aplicada neste projecto no âmbito da conservação do património cultural e arquitectónico a objectos de dimensões mais reduzidas, quando comparados à envergadura do Mosteiro, permite o registo e medição de um elevado número de pontos e, ainda, a preservação dos dados para restituições posteriores. A partir dos dados obtidos por fotogrametria é possível realizar medições e restituir tridimensionalmente (modelos 3D) o objecto.

1.2 Enquadramento do Objecto de Estudo

O Mosteiro de Santa Maria de Alcobaça está situado na cidade de Alcobaça, Sede de Concelho, do Distrito de Leiria, Região Centro e Sub-região do Oeste de Portugal Continental (Figura 1). O concelho de Alcobaça, constituído por treze freguesias com um total de 408.141 Km² de área e cerca de 54 400 habitantes, é limitado a Norte pelo concelho da Marinha Grande, a Este pelo de Leiria, Porto de Mós e Rio Maior, a Sul pelo de Caldas da Rainha e a Oeste pelo concelho da Nazaré [DGT, 2015; PORDATA, 2017].

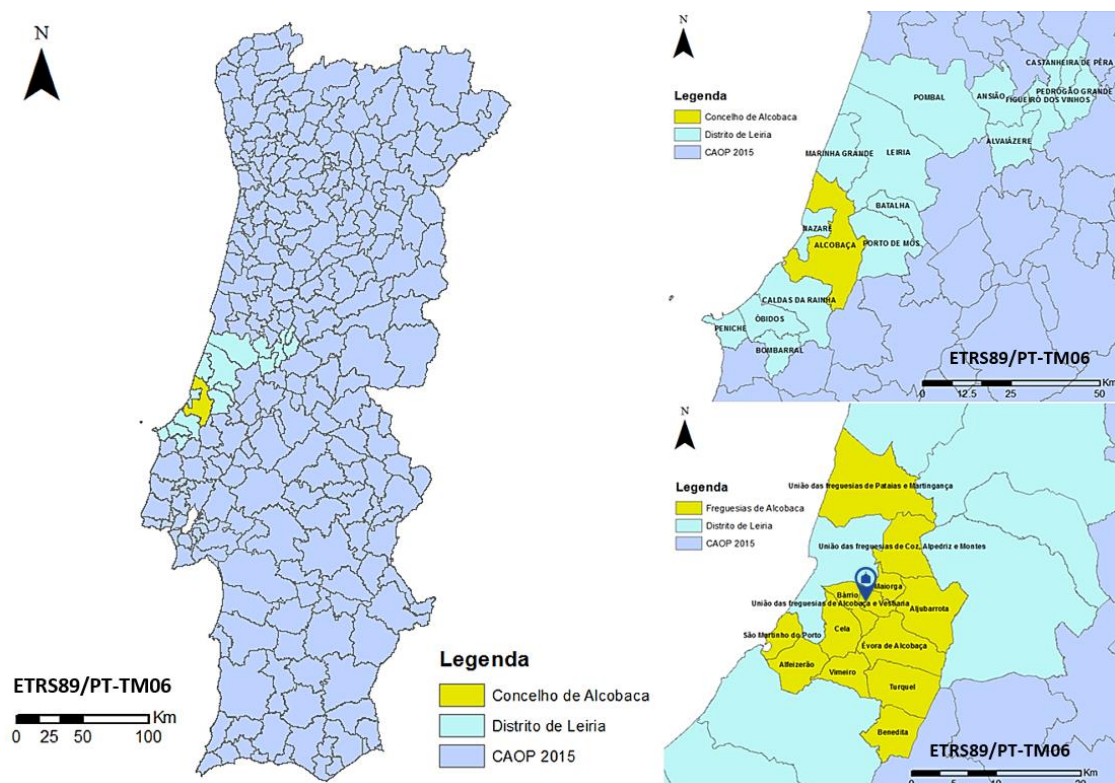


Figura 1 – Mapa da localização do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: Elaboração própria com recurso ao *software* ArcGIS 10.5.1.

O concelho de Alcobaça, fora dos aglomerados populacionais, é composto por matos, florestas e campos agrícolas. A zona oriental do concelho integra o Parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros, já a zona litoral é constituída por arribas, praias e uma baía natural em São Martinho do Porto. Fazem ainda parte da paisagem natural do concelho de Alcobaça os rios Alcoa e Baça, que atravessam a cidade – sendo importantíssimos no abastecimento de água à

população alcobacense e determinantes na escolha do local para a construção do Mosteiro de Alcobaça – indo desaguar junto a Nazaré [Mosteiro de Alcobaça, 2018].

Alcobaça desenvolveu-se em torno do Mosteiro de Alcobaça (Figura 2), considerado uma das primeiras fundações monásticas cistercienses edificadas em Portugal.



Figura 2 – Mosteiro de Alcobaça actualmente.
Fonte: DGPC.

O Mosteiro de Alcobaça é constituído por várias alas, com dependências medievais (Figura 3), ainda hoje conservadas e visitáveis (Igreja, Claustro de D. Dinis, Sala do Capítulo, Parlatório, Sala dos Monges, Dormitório e Refeitório). Deste monumento único no mundo são, ainda, pertença as seguintes edificações: Sacristia Medieval, Cozinha, Claustro da Hospedaria, Sala das Conclusões, Sala dos Reis, Ala Sul, Capela Senhor dos Passos, Capela Senhora do Desterro, Sacristia Nova, Capela Relicário, Claustro do Cardeal, Claustro do Rachadoiro, Biblioteca.

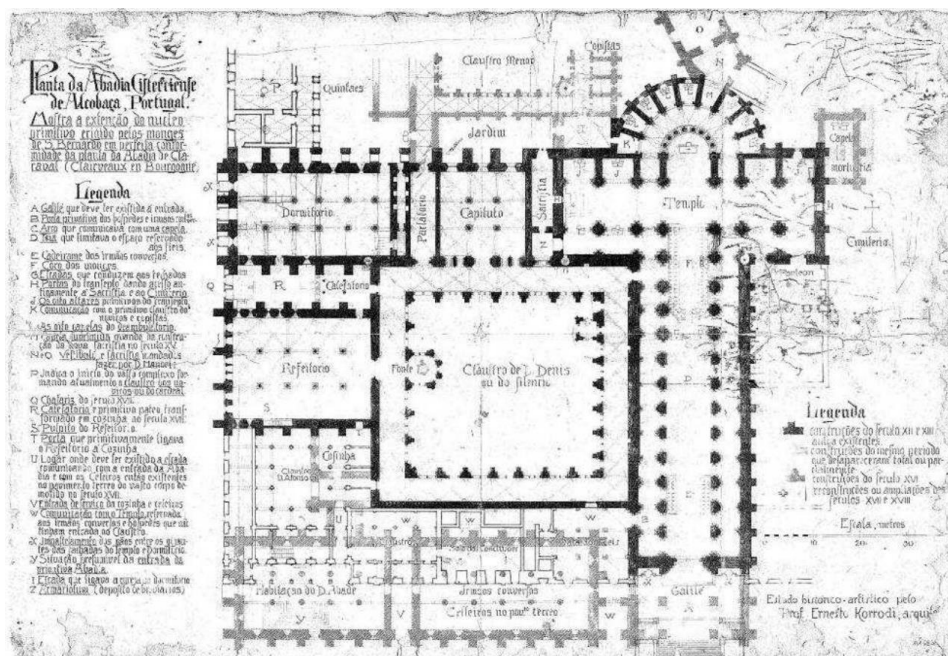


Figura 3 – Planta da Abadia de Alcobaça segundo o estudo do Prof. Ernesto Korrodi (arquivo DGPC).
Fonte: Antunes, 2013.

A Igreja, considerada o primeiro exemplar gótico português com a presença da dicotomia pedra/luz, foi construída sob a forma de cruz latina (símbolo do cristianismo) composta pela nave principal e pelo transepto. A nave principal é constituída por três naves abobadadas, divididas

por duas fileiras de 12 colunas (ou pilares). A construção da Igreja teve início pela cabeceira, constituída por nove capelas radiantes ligadas entre si e ao transepto por um deambulatório. A igreja é, ainda, sustentada por arcobotantes localizados na zona da cabeceira [Mosteiro de Alcobaça, 2018].

Para este projecto o maior interesse recai sobre as seguintes dependências: Igreja (Figura 4), Claustro de D. Dinis (Figura 5), Sacristia Nova (Figura 6) e Capela Relicário (Figura 7).

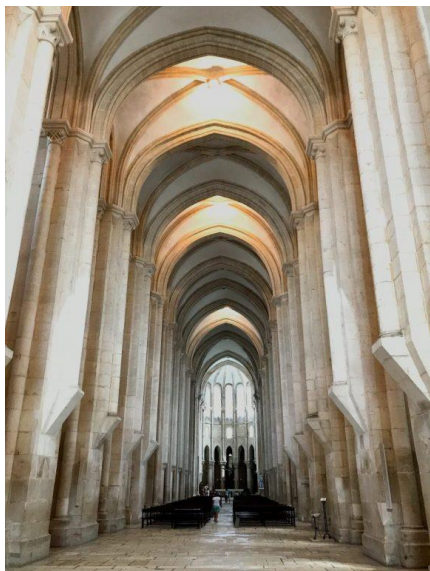


Figura 4 – Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: <https://www.turistaimperfeito.com/mosteiro-de-alcobaca/>.



Figura 5 – Claustro de D. Dinis no andar superior.

Fonte: DGPC.



Figura 6 – Sacristia Nova.

Fonte: DGPC.



Figura 7 – Capela Relicário.

Fonte: DGPC.

Além das dependências de grande envergadura que compõem o Mosteiro, também os túmulos de D. Pedro I e D. Inês de Castro constituem parte relevante e imprescindível do projecto. Estas arcas tumulares, ícones históricos e artísticos que elevam a importância intrínseca do

Mosteiro de Alcobaça em Portugal e no Mundo, de autoria desconhecida, encontram-se localizados na igreja desta Abadia: no braço Norte do transepto encontra-se o túmulo de D. Inês de Castro (Figura 8) e no braço Sul do transepto o de D. Pedro I (Figura 9), posicionados simetricamente em relação um ao outro.



Figura 8 – Túmulo de D. Inês de Castro (braço Norte do transepto da Igreja).
Fonte: Elaboração própria.



Figura 9 – Túmulo de D. Pedro I (braço Sul do transepto da Igreja)
Fonte: Elaboração própria.

O túmulo de D. Inês de Castro contém representações de momentos da vida de Cristo, nas faces laterais, do Calvário de Cristo, na cabeceira, e do Juízo Final, na face relativa aos pés. A figura jacente de D. Inês de Castro no topo do túmulo apresenta-se coroada e com anjos amparando-lhe a cabeça e o manto [Mosteiro de Alcobaça, 2018].

O túmulo de D. Pedro I possui reproduções das passagens da vida de São Bartolomeu, nas faces laterais, uma rosácea representando de forma concêntrica a Roda da Vida e Roda da Fortuna, na cabeceira, e a representação de dois momentos da Boa Morte do Rei, na face relativa aos pés. A figura jacente de D. Pedro I no topo do túmulo, segurando uma espada, apresenta-se amparada por anjos e conta com a presença de um cão deitado a seus pés [Mosteiro de Alcobaça, 2018].

O túmulo de D. Inês de Castro está assente em seis sustentáculos cujas figurações remetem para seres antropomórficos com rostos humanos (alusivos aos assassinos de D. Inês de Castro) e corpos de animais (Figura 10), já o túmulo de D. Pedro I encontra-se assente em seis estátuas de leões (Figura 11).



Figura 10 – Estátua que suporta o túmulo de D. Inês de Castro.
Fonte: Elaboração própria.



Figura 11 – Estátua que suporta o túmulo de D. Pedro I.
Fonte: Elaboração própria.

1.3 Objectivos

Pretende-se com este projecto obter produtos específicos de cariz científico e geométrico que auxiliem no estudo da evolução da arquitectura e métodos construtivos das várias fases de construção do Mosteiro de Alcobaça, designadamente:

- cortes, superfícies 3D, orto-imagens e modelos 3D do Claustro de D. Dinis, da Igreja do Mosteiro, da Sacristia Nova e da Capela Relicário, por aplicação da tecnologia TLS (*Terrestrial Laser Scanning*)
- modelos 3D e orto-imagens das principais arcos tumulares do Mosteiro (D. Pedro I e D. Inês de Castro), por aplicação de técnicas fotogramétricas de restituição múltipla automática.

Os produtos finais gerados, para além de base para estudos histórico-arquitectónicos, constituem uma forma de preservação da informação detalhada do Mosteiro no seu estado actual, servindo também para efeitos de salvaguarda e de reabilitação.

No âmbito deste projecto foram elaborados os seguintes textos científicos:

- Redweik, P., M. Sanchez-Fernandez, J.J. Sanjosé Blasco, e C. Silva (2017). Mosteiro de Alcobaça em 3D – Uma base geométrica para estudos históricos. Ciclo de Conferências Luzes e Sombras – Alcobaça no Processo Régio. 3 de Junho, Alcobaça (apresentação oral);
- Silva, C., P. Redweik, M. Sanchez-Fernandez, J.J. Sanjosé Blasco, J. Romo-Berlana, A. Pagará (2018). Contributo para o Estudo da Evolução da Construção no Mosteiro de Alcobaça. IX Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Amadora, Lisboa, 25-26 Outubro, p. 25 do livro de Resumos (Artigo de 8 pp.) – http://www.cncg.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/cncg_2019_2_1_2.pdf;
- Redweik, P., C. Silva, J.J. Sanjosé Blasco e M. Sanchez-Fernandez. Capítulo para o Livro Luzes e Sombras. Mosteiro de Alcobaça (17 pp.) – submetido.

1.4 Estrutura do Documento

O presente documento encontra-se estruturado em oito capítulos principais, divididos em subcapítulos. Cada capítulo compreende abordagens do tema respectivo sob o ponto de vista de ambas as tecnologias/técnicas adoptadas, designadamente o TLS e a restituição múltipla automática por fotogrametria.

No capítulo 2 é exposto o estado da arte, tendo por base projectos semelhantes apresentados em conferências ou simpósios e revistas científicas, disponíveis em portais diversos (nacionais e internacionais).

O capítulo 3 pretende contextualizar histórica e arquitectonicamente o Mosteiro de Alcobaça.

No capítulo 4 é descrito o fundamento teórico, como apoio à compreensão dos vários conceitos aplicados na componente prática do projecto.

O capítulo 5 apresenta a metodologia adoptada para a concretização dos objectivos do projecto, com descrição das diferentes etapas e materiais utilizados.

O capítulo 6 é referente às fases de pré-processamento e processamento propriamente dito dos dados, com vista à obtenção dos mais variados produtos gerados.

O capítulo 7 diz respeito aos produtos gerados e resultados obtidos após o processamento efectivo dos dados.

No capítulo 8 são mencionadas algumas das principais dificuldades sentidas ao longo deste projecto e perspectivas futuras de continuidade do mesmo.

No capítulo 9 são descritas algumas conclusões acerca do projecto desenvolvido.

2. ESTADO DA ARTE

A documentação do património tem sido uma constante preocupação na área da arquitectura. Ao longo da história, métodos e técnicas para catalogar e representar o património têm sido desenvolvidas em paralelo com as tecnologias disponíveis. A ideia de gerar documentação acerca do património cultural surge a partir do século XIX, inicialmente com esboços complementados com estudos topográficos, seguindo-se a utilização de técnicas com emprego da estação total e, por fim, com a utilização de instrumentos de aquisição massiva de dados, nomeadamente o *Laser Scanner* e a fotogrametria digital [Andrés and Pozuelo, 2009].

A fotogrametria digital e a tecnologia *Laser Scanning* Terrestre (TLS) são técnicas relativamente recentes e em constante evolução quer a nível instrumental quer em termos de sistemas computacionais. A escolha destas técnicas na catalogação e preservação digital do património recai sobre a facilidade de utilização, precisão de medição e pela rapidez de obtenção de grandes volumes de dados e permitem a utilização destes dados para obtenção de informação bidimensional (2D) e tridimensional (3D) [Kwoczyńska *et al.*, 2016; Pritchard *et al.*, 2017].

Vários investigadores apresentam projectos demonstrando a possibilidade de utilização de dados obtidos por TLS, respectiva visualização de nuvens de pontos e utilização desses dados para geração de diversos produtos, nomeadamente, cortes, projecções e modelos 3D mensuráveis e, ainda, visitas virtuais. Marambio y Almirall [2006] e Xiao *et al.* [2007] apresentam um estudo com o objectivo de gerar orto-imagens e modelos 3D da Igreja de Santa Maria do Mar (Barcelona) e de San Fan Qi Xiang (China), respectivamente, como contributo à preservação dos monumentos. Leonov *et al.* [2015] apresenta um modelo 3D da Torre de Shukhov (Moscou, Rússia) para disponibilizar uma visita virtual através de um *software open source* (*OpenSceneGraph*). Kwoczyńska *et al.* [2016] tem como casos de estudo o Castelo de Lidzbark e a Cripta da Catedral Basílica Metropolitana, em Przemyśl, com o intuito de gerar modelos 3D, cortes e projecções.

A tecnologia TLS permite, também, realizar medições aos edifícios históricos de forma simples, rápida e não destrutiva. Herráez *et al.* [2014] apresenta um trabalho cujo objectivo é determinar a espessura das abóbadas da igreja de Santa Maria de Magdalena, em Valência, a partir de um levantamento por TLS do intradorso e extradorso da igreja (recorrendo a um sistema de prumo), obtendo-se as respectivas geometrias 3D. A combinação das duas geometrias possibilita a determinação da espessura das abóbadas.

Existem, ainda, estudos que revelam a adopção de metodologias baseadas no desenvolvimento de novos algoritmos para o processamento de nuvens de pontos e geração de modelos 3D. Barrile *et al.* [2016] apresenta-nos um estudo cujo objectivo principal é obter um algoritmo a ser implementado no Matlab [MathWorks, 2019] para realizar o alinhamento das nuvens de pontos colectadas por TLS – algoritmo ICP (Iterative Closest Point). A partir das nuvens de pontos são obtidos modelos 3D com intenção de serem integrados na web, em *smartpho-*

nes e outros dispositivos que utilizem o sistema *Android* em ambiente Web-GIS e, ainda, utilizar a tecnologia de realidade aumentada para uma combinação entre o mundo real e objectos virtuais 3D, integrados no campo visual do utilizador e com os quais é possível interagir em tempo real. Castellazzi *et al.* [2017] desenvolveram um sistema alternativo para a modelação 3D de nuvens de pontos de edifícios históricos, obtidas quer por TLS quer por fotogrametria de curto alcance, com o intuito de automatizar e aumentar o rendimento do respectivo processamento. Este sistema consistiu na aplicação de um modelo matemático desenvolvido pela equipa com o objectivo de gerar modelos 3D a partir da identificação de elementos das estruturas dos edifícios de geometrias comuns (paredes, janelas, portas, escadas, etc.) através de cortes sucessivos nos planos horizontal e vertical. Adicionalmente, capacitaram a possibilidade de atribuição de um conjunto de parâmetros relativos ao tipo de material por cada geometria identificada.

Actualmente, têm surgido diversos estudos que apresentam a combinação das técnicas de fotogrametria e TLS com o objectivo de se obter mais informação, de forma a colmatar as insuficiências de cada uma das técnicas, e textura foto-realista. Lerma *et al.* [2010] utiliza a combinação das técnicas TLS e fotogrametria de curto alcance com a finalidade de criar um DSM de elevado detalhe e foto-realista de uma gruta com gravuras do paleolítico – património da UNESCO desde 1998, em Parpalló (Valencia), para estudos exaustivos nas áreas da morfologia, paleontologia ou futuras intervenções de conservação. Também Andrés *et al.* [2012] esclarece como se pode obter um modelo 3D próximo da realidade através da combinação das técnicas TLS e fotogrametria aplicadas ao interior e exterior da Porta de Antioquia na cidade de Alepo, declarada Património da Humanidade pela UNESCO. Esta combinação permite estudar as patologias da pedra usada e respectiva degradação.

A utilização de nuvens de pontos tem vindo a ganhar uma grande adesão na investigação relativa à degradação dos edifícios históricos, permitindo a adopção de medidas de prevenção, protecção, conservação e restauro de monumentos de grande apreço patrimonial.

Crespo *et al.* [2010] e Armesto-González *et al.* [2010] pretenderam adoptar uma metodologia que permitisse documentar e analisar as ruínas de Santo Domingo, em Pontevedra (Galiza), recorrendo à tecnologia TLS e a uma câmara fotográfica, para obtenção de informação de intensidade e cor. A metodologia consiste em combinar esta informação com técnicas de classificação de imagens (não supervisionada) a partir de diferentes algoritmos estatísticos, para detectar a degradação de materiais pedregosos empregues no monumento (granito) ou em outros edifícios históricos.

Bitelli *et al.* [2017] pretendeu gerar um modelo 3D que recriasse virtualmente um monumento (torre civil Sant'Alberto) que foi parcialmente destruído durante a invasão das tropas alemãs em 1944. Para tal recorreu à combinação de técnicas de restituição fotogramétrica (a partir de várias fotografias prévias à destruição) e do TLS. O TLS foi aplicado ao que resta do monumento para se obter a respectiva textura e para identificação de pontos de controlo (como apoio ao processamento da restituição fotogramétrica). Desta forma é possível gerar modelos

de monumentos históricos deteriorados, de forma semi-automática, flexível e versátil, desde que se disponha de um leque de fotografias considerável anteriores à degradação ou ruína.

Quagliarini *et al.* [2017] pretendeu adoptar uma metodologia de cariz rápido, seguro e de baixo custo, para analisar o estado de conservação, anomalias e nível de risco de um monumento histórico (Igreja de Santa Maria em Portonovo – Itália). A metodologia aplicada, após a aquisição de dados por TLS com câmara fotográfica integrada, permitiu identificar zonas restauradas e zonas em início de degradação da igreja. Esta metodologia recorreu a formas geométricas que melhor representassem os elementos arquitectónicos e consistiu: numa primeira fase, em realizar uma leitura geral e imediata para a verificação de possíveis anomalias no elemento arquitectónico através da melhor aproximação entre esse elemento e a forma geométrica respectiva (um grande coeficiente de variação sugere a presença de anomalia no elemento); numa segunda fase, em analisar e reconhecer de forma minuciosa o tipo de anomalia (deformação, alteração na estrutura, degradação ou trabalhos de restauração) de cada elemento identificada na primeira fase.

3. CONTEXTO HISTÓRICO E ARQUITECTÓNICO

A história da cidade de Alcobaça está indissociavelmente ligada à Ordem de Cister, dado que a ocupação do território pelos cistercienses, iniciada em 1153, impulsionou o desenvolvimento desta região. A Abadia Real de Santa Maria de Alcobaça (Figura 12) constitui uma das fundações cistercienses mais antigas de Portugal e a primeira da Região Centro [Jorge, 2017].



Figura 12 – Frontaria do Mosteiro de Alcobaça nos anos 30-40 do século XX.

Fonte: Fotografia de Domingos Alvão.

O território de Alcobaça, doado pelo Rei D. Afonso Henriques, em 1153, após a conquista de Santarém aos mouros, a Bernardo de Claraval (grande impulsionador da Ordem de Cister) para edificação de um Mosteiro, consistia num local ameno, densamente florestado, solitário e localizado na confluência dos rios Alcoa e Baça, pelo que ia ao encontro dos critérios seguidos pela Ordem para as suas fundações. As características hidrográficas e fisiográficas, por garantirem o bom funcionamento do sistema hidráulico, determinaram a escolha do sítio para a sua construção, iniciada em 1178 [Jorge, 2017].

O sistema hidráulico (Figura 13 e Figura 14), de grande importância e engenho, será possivelmente o mais audaz e extenso da Idade Média religiosa portuguesa, o qual requereu, para a sua construção, um grande investimento em mão-de-obra e materiais. Actualmente encontra-se, infelizmente, em processo de abandono e avançada desintegração [Jorge, 2017].

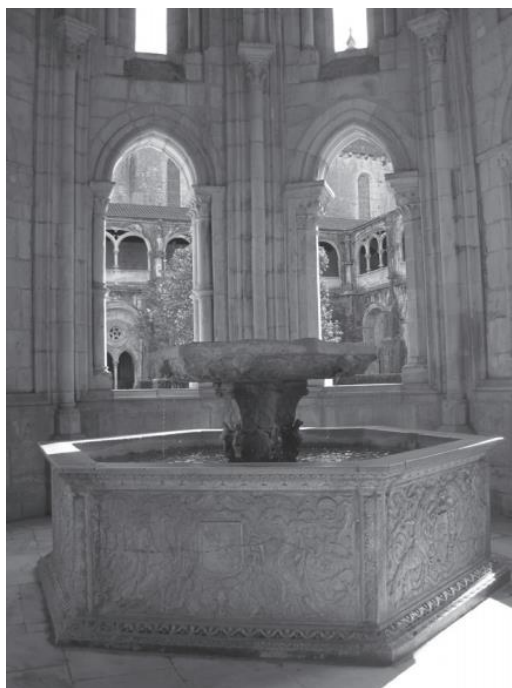


Figura 13 – Interior da casa do lavabo da Abadia de Alcobaça.

Fonte: Fotografia de Virgolino Jorge.

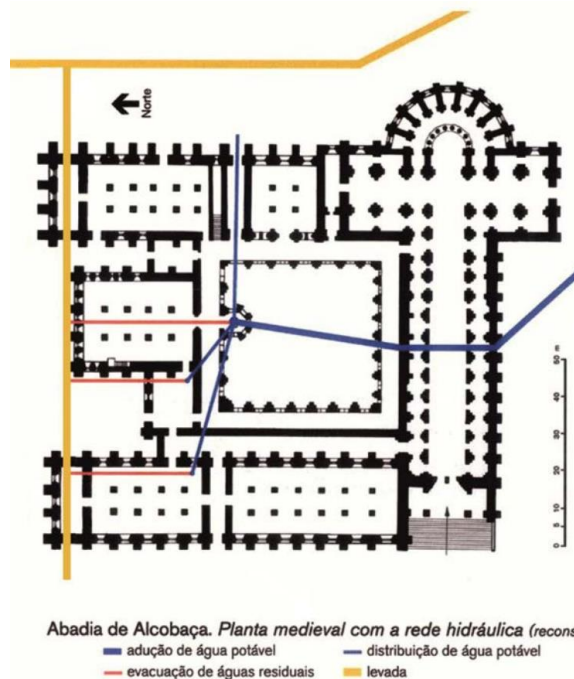


Figura 14 – Rede hidráulica medieval da Abadia de Alcobaça.

Fonte: Jorge, 2017.

Os monges vieram a ocupar o novo edifício (aleadamente cópia fiel da abadia-mãe francesa, Claraval III (Figura 15), mas em posição invertida) em 1223, onde abraçaram o exercício da vida monástica, repartida entre a oração e o trabalho manual, em concordância com a Regra de São Bento. A consagração da igreja veio a realizar-se em 1252 [Jorge, 2017].

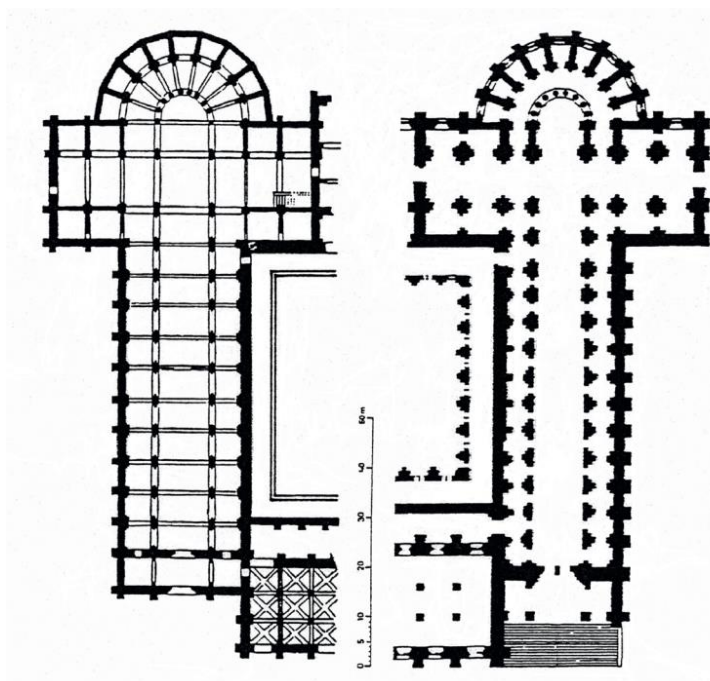


Figura 15 – Plantas das Igrejas das Abadias de Claraval III (esquerda) e de Alcobaça (direita).

Fonte: Jorge, 2017.

A construção do Claustro do Silêncio ou de D. Dinis (designação derivada do facto de ter sido este monarca o seu principal patrocinador) teve início em 1308, sendo considerado o maior claustro da primeira dinastia portuguesa. No início do século XVI, durante o reinado de D. Manuel I, foi-lhe acrescentado um piso superior (Figura 16 e Figura 17) [Cocheril, 1989].



Figura 16 – Claustro de D. Dinis possivelmente no século XIX.
Fonte: Fotografia de Francesco Rocchini.



Figura 17 – Claustro de D. Dinis actual.
Fonte: Elaboração própria.

Entre os séculos XVI e XVIII, o mosteiro sofreu obras de ampliação e alterações diversas, destacando-se as ocorridas na capela-mor (1667-1678) e na fachada da igreja, esta concluída em 1725 [Cocheril, 1989; Jorge, 2017]. Na capela-mor, construiu-se um retábulo com três registos, composto por colunatas e esculturas em terracota de grandes dimensões (ainda hoje preservadas no mosteiro) conforme representado na Figura 18, escondendo a colunata medieval original.



Figura 18 – Capela-mor do Mosteiro de Alcobaça no período barroco.
Fonte: Fotografia de Domingos Alvão, anos 30-40 do século XX.

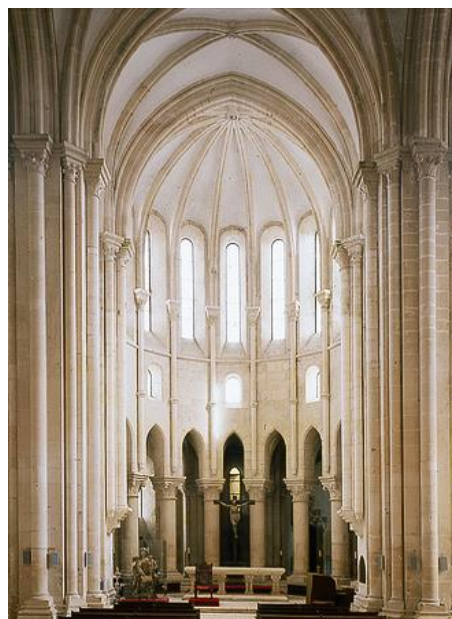


Figura 19 – Capela-mor do Mosteiro de Alcobaça no período actual.
Fonte: Plataforma do Mosteiro de Alcobaça.

No século XX, no contexto das obras de restauro “em unidade de estilo” promovidas pela extinta Direcção-Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais, o retábulo barroco foi desmontado, devolvendo-se ao presbitério a sua configuração medieval (Figura 19).

A história da Abadia de Alcobaça está, ainda, relacionada com a marcante história de amor proibido entre o infante D. Pedro I e D. Inês de Castro. Os túmulos de D. Pedro I e de D. Inês de Castro, extraordinárias obras-primas da arte funerária medieval europeia, construídas sob ordens de D. Pedro I, preservam-se no transepto da Igreja, um em cada braço (Figura 8 e Figura 9), localização definida na década de 50’ do século XX. Até esta altura a localização e disposição dos túmulos foram sofrendo alterações, encontrando-se, inicialmente, lado a lado, no braço sul no transepto da Igreja e, posteriormente, na Sala dos Túmulos (ou Panteão Régio – Figura 20). Durante as invasões francesas (1808-1814) os túmulos terão sofrido danos que comprometeram a sua integridade, contudo, preservam toda a sua monumentalidade.



Figura 20 – Túmulos de D. Pedro I e D. Inês de Castro no Panteão Régio.

Fonte: Fotografia de Domingos Alvão.

Em 1833, após mais de seiscentos anos de ocupação, os monges abandonam o Mosteiro, sendo decretada a extinção das ordens religiosas em Portugal no ano seguinte. Em 1910, o Mosteiro de Alcobaça foi classificado Monumento Nacional, tendo sido inscrito na Lista do Património Mundial da UNESCO em 1989 [Jorge, 2017].

O Mosteiro de Alcobaça é um edifício de ilustre expressão histórica e valor artístico da arquitectura sacra medieval, marcado pela escala e graciosidade estética da sua Igreja, que utiliza, segundo o ensaio “Espaço e eutímia na Abadia Medieval de Alcobaça” de Virgolino Jorge, uma estrutura modular ortogonal, como sistema rigoroso e coerente. A grelha ortogonal representada na Figura 21 e Figura 22 regula e controla todas as dimensões fundamentais do edifício (por exemplo, a espessura de paredes, pilares e contrafortes, etc.) [Jorge, 2017].

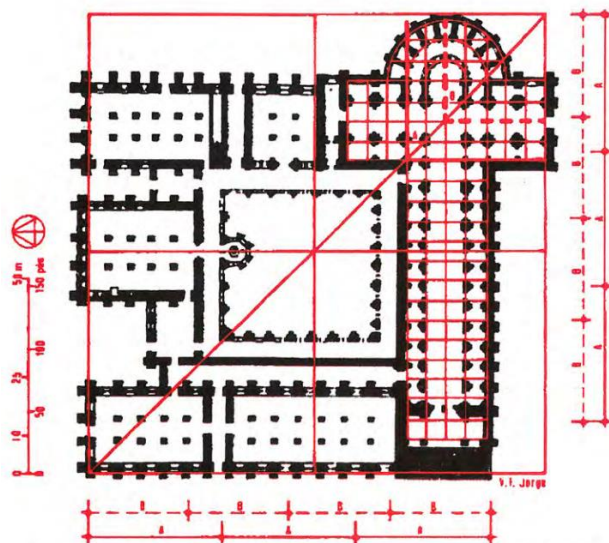


Figura 21 – Planta medieval (reconstituição) da Abadia de Alcobaça, no traçado modular.
Fonte: Jorge, 2017

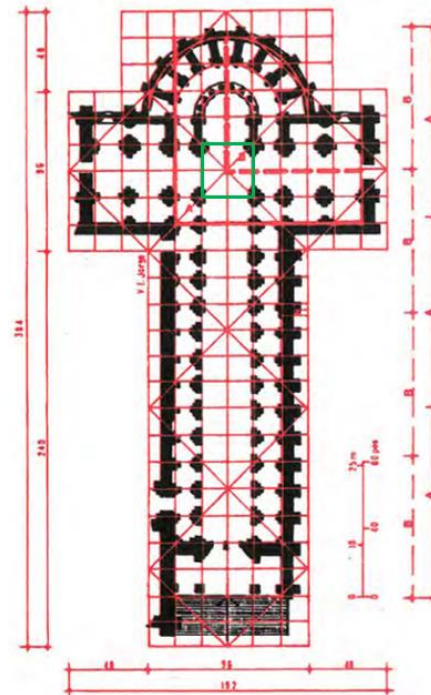


Figura 22 – Planta medieval da igreja da Abadia de Alcobaça (reconstituição) no traçado modular.
Fonte: Jorge, 2017

Jorge [2017] refere, ainda, que a modulação simples segundo a quadratura, considerada de grande eficácia funcional e estética, foi intitulada de lei áurea na arquitectura dos Cistercienses, uma vez que gera não só proporções comensuráveis como possibilita, também, uma organização eurítmica do espaço edificado, sem partes residuais.

A medida de comprimento adoptada na arquitectura da Abadia de Alcobaça foi o pé real (ou pé de Paris), equivalente a 0.324839 metros. O módulo construtivo unitário é de 32 pés reais, correspondente a 10.40 metros de lado e equivalente à largura do cruzeiro (Figura 22 – representação a verde), quartado em submódulos de 16 pés de lado [Jorge, 2017].

Apesar das diferentes campanhas de trabalhos na Abadia, esta figura modular inicial terá sido sempre mantida, a fim de assegurar a morfometria da composição. [Jorge, 2017].

Podem ser observadas, em vários pontos do Mosteiro, algumas diferenças na espessura das paredes e desfasamentos entre pilares e colunas que têm impulsionado a discussão e elaboração de teorias por vários estudiosos, levando-os a afirmar, ou pelo menos a alegar, a existência de diferentes fases de construção da Abadia e/ou de Mestres-de-obras.

Jorge [2017] afirma, ainda, que Maur Cocheril defende a existência de duas fases construtivas da Igreja, nomeando-as de Alcobaça I (igreja primitiva) e Alcobaça II (Figura 23), onde a primitiva igreja (plano clássico Bernardino, cuja capela-mor era de planta rectangular) jaz nos alicerces de Alcobaça II, concluindo que a cabeceira terá sido reconstruída e segundo o plano da de Claraval III.

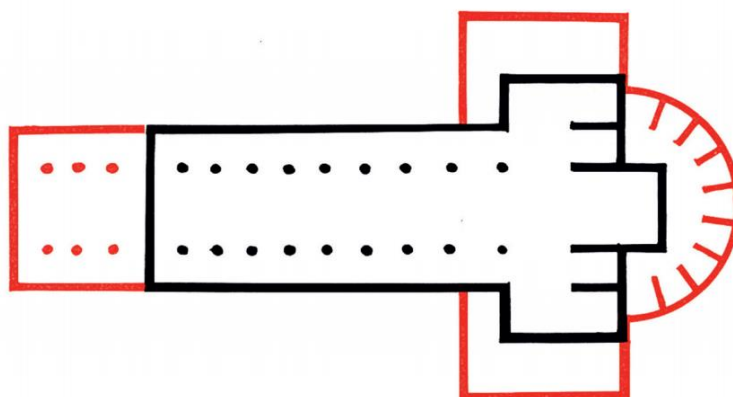


Figura 23 – Planta da igreja de Alcobaça I (preto) e Alcobaça II (vermelho) segundo M. Cocheril.

Fonte: Jorge, 2017.

No decorrer dos séculos XVIII e XIX, o Mosteiro de Alcobaça presenciou grandes calamidades que provocaram prejuízos avultados, forçando a realização de obras de reconstrução e conservação, destacando-se os eventos do terramoto de 1755 [Teixeira, 2002], a grande inundação de 1774 [Leroux, 2012] e as invasões francesas em 1810 [Teixeira, 2002].

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Laser Scanning Terrestre

4.1.1 Princípio de funcionamento do LiDAR Terrestre

O LiDAR Terrestre (*Light Detection And Ranging*), ou *Laser Scanning Terrestre* (TLS), consiste numa tecnologia que tem por base a medição de distâncias, desde o sensor até ao objecto, através da emissão e recepção de um feixe laser, a partir de um instrumento estacionado no solo. Trata-se de uma tecnologia comumente utilizada nas últimas décadas e em constante desenvolvimento que permite a obtenção de grandes volumes de dados (nuvens de pontos tridimensionais do objecto), com elevada resolução, de forma directa, rápida e precisa e a partir das quais se podem gerar superfícies e outros elementos descritivos do respectivo objecto [Kuçak *et al.*, 2016].

O sistema LiDAR Terrestre pode ser utilizado em posições fixas (TLS estático) ou em plataformas móveis (MLS). Um *laser scanner* estático, utilizado no presente projecto, tem como elementos principais o emissor de laser, o deflector com codificador de ângulo e o motor de rotação em torno do eixo principal do instrumento (Figura 24).

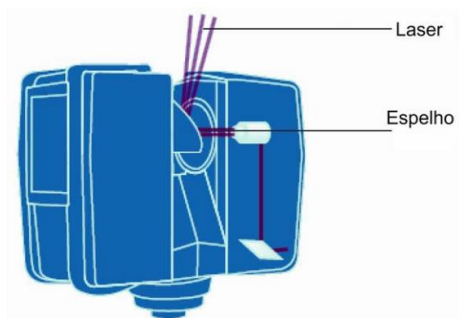


Figura 24 – Deflexão do laser – *Laser scanner FARO Focus^{3D} X330*.

Fonte: FARO, 2013.

O *Laser Scanner* emite um feixe laser para o centro de um espelho rotativo (que deflete o feixe laser numa rotação vertical) numa dada direcção, cuja orientação espacial é determinada por um ângulo horizontal e outro vertical, designadamente, azimuth (*az*) e elevação (*el*). O ângulo de elevação é obtido pelo codificador de ângulos para cada feixe emitido e o azimuth é determinado para cada perfil a partir de uma direcção de referência do *Laser Scanner*. Cada feixe laser ao atingir a superfície de um dado objecto é reflectido e parte desse reflexo retorna ao *laser scanner*, permitindo calcular a distância *r* do ponto atingido pelo feixe (Figura 25) [Redweik, 2018].

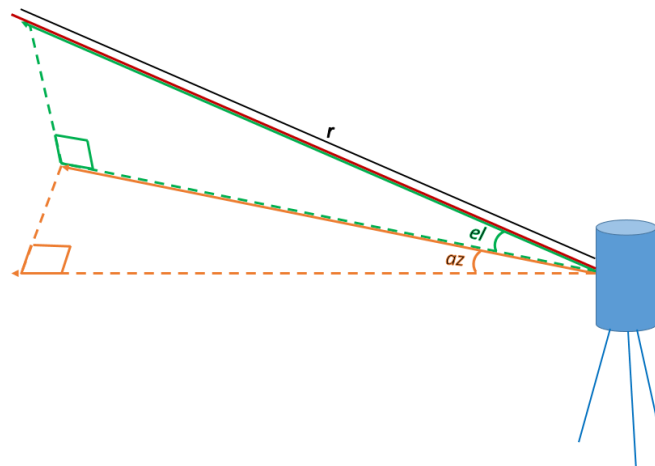


Figura 25 – Coordenação de um ponto medido por *laser scanning* (coordenadas esféricas).
Fonte: Elaboração própria.

A transformação das coordenadas esféricas obtidas por *laser scanning* em coordenadas cartesianas faz-se pela seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + R_{\omega\phi k} \begin{bmatrix} r \cos el \sin az \\ r \cos el \cos az \\ r \sin el \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde (X, Y, Z) são as coordenadas cartesianas do ponto medido, (X_0, Y_0, Z_0) as coordenadas da origem do feixe no *Laser Scanner*, (r, el, az) as coordenadas esféricas do ponto medido e $R_{\omega\phi k}$ a matriz de rotação entre o sistema de coordenadas local do *Laser Scanner* e o sistema de coordenadas global [Redweik, 2018].

O princípio de medição do *Laser Scanner* pode incluir-se numa de três categorias: tempo de voo do sinal (*time-of-flight*), diferença de fase (*phase shift*) e triangulação (*laser triangulation*) [Ebrahim, 2015].

O *Laser Scanner* utilizado neste projecto utiliza o princípio de funcionamento baseado na diferença de fase. A distância entre o objecto e o *Scanner* é determinada pela diferença de fase ($\Delta\phi$) medida entre o sinal emitido e o recebido. Na Figura 26 encontra-se representado um possível esquema para a medição por diferença de fase.

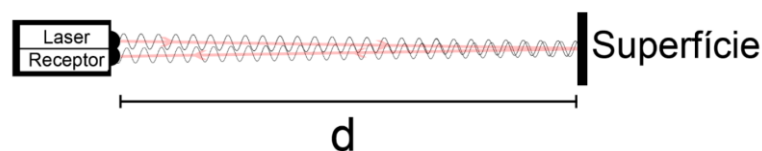


Figura 26 – Representação básica do princípio de medição do *Laser Scanner* baseado na diferença de fase.
Fonte: Mendonça, 2017.

A distância d ao objecto é calculada relacionando a diferença de fase ($\Delta\phi$), a frequência modulada ($f_{modulada}$) e o tempo de voo do sinal (Δt) e tendo por base a equação definida para o caso do método *time-of-flight* (onde c é a velocidade da luz, $c = 299792458 \text{ m/s}$) [Van Genechten, 2008]:

$$\Delta t = \frac{\Delta \phi}{2\pi \cdot f_{modulada}} \quad (2)$$

$$d = c \frac{\Delta t}{2} = \frac{c}{4\pi} \cdot \frac{\Delta \phi}{f_{modulada}} \quad (3)$$

Para a execução do levantamento com TLS é necessário definir determinados parâmetros, nomeadamente, a resolução do varrimento, a sua abertura e o FOV (*Field of View*) (Figura 27). A resolução do varrimento é, normalmente, definida como a distância média entre pontos de um *scan* a uma dada distância do *Laser Scanner*. A uma maior resolução equivale uma menor distância entre pontos e um levantamento mais moroso. A abertura do varrimento consiste no ângulo máximo de abertura em torno do eixo principal do *Laser Scanner* ao longo do qual são realizados os perfis de pontos (360° para o *Laser Scanner* utilizado neste projecto). O FOV constitui o maior ângulo de basculação do deflector em cada perfil (300° para o *Laser Scanner* utilizado neste projecto) [Redweik, 2018].

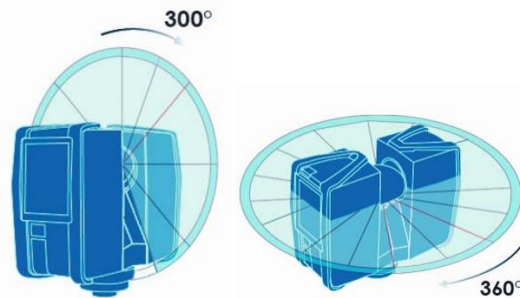


Figura 27 – Representação do FOV (esquerda) e da abertura (direita) do *Laser Scanning* utilizado.
Fonte: FARO, 2013.

Geralmente, para a realização do levantamento com TLS estático, não é possível obter o varrimento completo do objecto de uma só posição / estacionamento, pelo que terão de ser efectuados múltiplos estacionamentos do *Laser Scanner* até se garantir a completude do respectivo objecto, gerando uma nuvem de pontos para cada estacionamento. Cada nuvem de pontos tem um sistema de coordenadas diferente, uma vez que está referida ao sistema de coordenadas local do *Laser Scanner*. Neste sentido, as nuvens de pontos geradas nos vários estacionamentos serão, posteriormente, orientadas relativamente umas às outras de modo a ficarem num só sistema de coordenadas – registo de nuvens de pontos. Para o registo de nuvens são utilizados alvos (planos ou esféricos) durante o levantamento, colocados estrategicamente, de modo a que possam ser vistos e correspondidos entre cada dois varrimentos, sendo requerido um mínimo de 3 alvos comuns não colineares. A existência de superfícies planas no objecto é também favorável ao registo automático com ou sem alvos. As nuvens de pontos poderão, caso necessário, ser georreferenciadas. [Redweik, 2018].

Actualmente os *softwares* detêm algoritmos específicos para o registo automático das nuvens de pontos, nomeadamente, o algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*) que consiste em encontrar iterativamente o alinhamento correcto entre dois ou mais conjuntos de dados, através da aplicação de rotações e translações de um conjunto relativamente ao outro [Jost and Hügli, 2002; Procházková and Martišek, 2018].

4.1.2 TLS Fotogramétrico

Nos dias de hoje, todos os TLS integram ou acoplam uma câmara fotográfica, transformando-se em TLS fotogramétricos [Redweik, 2018]. O TLS utilizado neste projecto integra a técnica HDR (*High Dynamic Range Imaging*) que consiste em melhorar as fotografias obtidas durante o varrimento fotográfico. O HDR permite que a câmara integrada no *Laser Scanner* recolha várias fotografias com diferentes aberturas e tempos de exposição de uma mesma região do objecto de estudo (obtendo-se imagens com mais ou menos iluminação) e combine as respectivas exposições numa única imagem, por forma a reduzir zonas escuras e reflexos indesejados, aumentar os detalhes e preservar informação que de outra forma não seria possível reter [Theodor and Furr, 2009]. As fotografias obtidas durante o varrimento fotográfico viabilizam a coloração da nuvem de pontos 3D, por aplicação de equações de colinearidade (4), associando cada ponto da nuvem a um *pixel* da imagem [Redweik, 2015]:

$$x = x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (4)$$

$$y = y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

As equações de colinearidade relacionam as coordenadas imagem de um ponto e as coordenadas 3D objecto do mesmo ponto, admitindo que um ponto objecto no espaço (X,Y,Z) se conecta ao ponto imagem correspondente (x,y,0) através de uma recta que passa pelo centro de projecção (X₀, Y₀, Z₀). Os parâmetros (x₀, y₀, c) correspondem às coordenadas imagem do centro de projecção da imagem (c é a distância focal) e os elementos r_{ij} correspondem aos elementos da matriz de rotação espacial entre os sistemas de coordenadas da imagem e do objecto, registados pelo *Laser Scanner* no momento em que cada fotografia é obtida [Redweik, 2015].

4.2 Fotogrametria Terrestre

4.2.1 Origens da Fotogrametria Digital

A fotogrametria é uma técnica que utiliza medições sobre as fotografias para a reconstrução tridimensional do objecto.

Os primeiros princípios e técnicas de fotogrametria terrestre desenvolveram-se no ano de 1851 por Aimé Laussedat [Coelho e Brito, 2007]. No entanto, só em 1858 surge a ideia a Albrecht Meydenbauer, um jovem arquitecto, de gerar documentação fotogramétrica para o património cultural [Albertz, 2001].

A fotogrametria digital surge no fim dos anos 80 do século XX, com a utilização de imagens digitalizadas como fonte primária de dados. As câmaras fotográficas digitais de alta resolução

surgem nos anos 90, possibilitando a sua integração na fotogrametria, com vista à aquisição directa de imagens digitais. A aplicação da fotogrametria tornou-se muito popular a partir de 2010 devido à evolução dos sistemas computacionais e *softwares* com algoritmos capazes de processar de forma automatizada as imagens digitais, com vista à restituição fotogramétrica (modelação 3D), sem necessidade de se recorrer a medições no local nem de pré-calibração da câmara fotográfica [Kraus, 2007; Luhmann *et al.*, 2014].

As técnicas fotogramétricas representam uma poderosa ferramenta para a documentação e descrição de objectos, com particular importância no âmbito da conservação e divulgação do património arquitectónico e cultural.

Neste projecto os objectos foram reconstruídos tridimensionalmente através do método de restituição múltipla automática.

4.2.2 Restituição Múltipla Automática

A restituição múltipla pode ser realizada de um modo interactivo ou de um modo automático. No método de restituição múltipla interactiva é necessário realizar uma cobertura fotográfica composta por sucessivas fotografias convergentes, isto é, fotografias obtidas com os eixos fotográficos convergentes e, de preferência, de pontos estação a diferentes cotas. Dever-se-á, ainda, ter em conta uma grande área de sobreposição entre as fotografias obtidas, garantindo a cobertura de cada ponto do objecto por pelo menos três fotografias. No modo automático, a cobertura fotográfica deverá respeitar a grande sobreposição, mas os eixos fotográficos devem-se aproximar do paralelismo de modo a que fotografias sucessivas não sejam demasiado diferentes, o que dificulta o desempenho de operadores automáticos de detecção de pontos homólogos. Para a restituição tridimensional de um objecto poderão ser utilizados pontos naturais do objecto (bem definidos no caso do modo interactivo) ou marcas ou padrões artificiais projectados sobre o objecto quando este não apresenta textura suficiente [Redweik, 2013].

A restituição múltipla automática concentra-se em três etapas: detecção automática de um grande conjunto de pontos homólogos (*tie points*) extraídos sucessivamente das imagens da cobertura por processos de correlação de imagem, recuperação das orientações (interna e externa) da câmara para cada fotografia (relação entre a fotografia e o objecto fotografado e relação entre fotografias da cobertura) e determinação das coordenadas 3D de cada par de pontos correspondentes nas diferentes fotografias.

A orientação interna consiste na reconstrução do feixe perspectivo que deu origem à fotografia, isto é, permite conhecer e recuperar a posição de cada fotografia dentro da câmara no momento em que foi obtida [Redweik, 2015]. Considera-se feixe perspectivo, o conjunto de rectas que unem cada ponto objecto ao respectivo ponto imagem e que passam pelo centro de projecção.

A orientação externa permite posicionar e orientar no espaço o feixe perspectivo que deu origem à fotografia, ou seja, consiste na obtenção da posição da câmara (do centro óptico da objectiva) e da orientação do eixo fotográfico no espaço-objecto no momento da tomada da

fotografia, através da determinação de seis parâmetros (coordenadas objecto do centro de projecção – X_0 , Y_0 , Z_0 , e três ângulos independentes que definem a orientação do sistema de coordenadas imagem 3D no espaço objecto) [Redweik, 2015].

A geração de uma nuvem densa de pontos 3D descritiva da superfície do objecto é alcançada automaticamente por técnicas/operadores digitais de correspondência de imagens que determinam, de forma automática, pontos homólogos em duas ou mais fotografias e calculam as respectivas coordenadas 3D por intersecção espacial directa [Redweik, 2015].

A superfície do modelo 3D do objecto é obtida, posteriormente, através de uma malha de triângulos adjacentes (*mesh* ou TIN) produzida tendo por base a nuvem de pontos que lhe corresponde. A coloração da superfície do modelo é obtida por ortorrectificação das fotografias em cada triângulo da *mesh*.

4.2.3 Ortorrectificação digital – Ortofotos/Ortomosaicos

A ortorrectificação digital consiste na transformação de imagens fotográficas digitais (projectão central) em imagens ortogonais digitais do objecto (ortofotos digitais - projecção ortogonal), onde a representação do pormenor do objecto detém tanta densidade de informação quanto a fotografia original [Redweik, 2015].

A rectificação digital recorre a algoritmos fotogramétricos, ao DSM (Modelo Digital de Superfície), obtido através da nuvem densa de pontos 3D, e a operações de PDI (Processamento Digital de Imagem). A rectificação é realizada sobre um plano ou superfície pré-definidos [Redweik, 2015].

A ortorrectificação digital é um método muito preciso que, por aplicação sucessiva das equações de colinearidade (rectificação analítica) a todos os *pixels* da imagem, permite obter imagens digitais geometricamente rigorosas de escala uniforme e sem distorções projectivas e perspectivas. Neste sentido, todas as distâncias no plano de referência são preservadas, possibilitando a realização de operações métricas [Redweik, 2015].

Os ortomosaicos são elaborados a partir das imagens ortorrectificadas e correspondem a um produto com qualidade radiométrica homogénea.

5. METODOLOGIA

5.1 Laser Scanning Terrestre

A metodologia aqui apresentada tem como propósito satisfazer os objectivos enunciados no subcapítulo 1.3 e consiste em três principais etapas: levantamento em campo, processamento dos dados e resultados.

Antes de se proceder ao levantamento foi realizado um planeamento prévio para a sua preparação que compreende as tarefas de delineação da localização e do número de estacionamentos a executar e de deliberação sobre a resolução e qualidade ideal a adoptar para o cumprimento dos objectivos definidos.

O levantamento foi efectivado para a Igreja, Claustro de D. Dinis, Sacristia Nova e Capela Relicário do Mosteiro de Alcobaça. Como resultado deste levantamento obtiveram-se, de forma rápida e directa, nuvens densas de pontos tridimensionais (com coordenadas XYZ) do Mosteiro de Alcobaça.

A aquisição dos dados (Figura 28) foi realizada a partir do *Laser Scanner Terrestre FARO Focus^{3D} X 330* (Figura 29) com a capacidade de emitir até 1 milhão de impulsos por segundo com uma precisão de 1 milímetro a uma distância de 25 metros. Este instrumento tem, ainda, um alcance máximo de 330 metros e um FOV de -60° a 90° na direcção vertical e de 0° a 360° na direcção horizontal (Tabela 1) [FARO, 2013].

Tabela 1 – Especificações do *Laser Scanner FARO Focus^{3D} X 330*.

Fonte: FARO, 2013.

ESPECIFICAÇÕES DO LASER SCANNER FARO FOCUS^{3D} X 330	
Número de impulsos	Até 1 milhão por segundo
FOV	Direcção vertical: -60° a 90° Direcção horizontal: 0° a 360°
Precisão	1 mm a 25 m
Alcance	0.6 - 330 m
Erro sistemático da distância	± 0.2 mm
Peso	5.2 Kg
Dimensões	24 x 20 x 10 cm



Figura 28 – Levantamento do Mosteiro de Alcobaça.
Fonte: Fotografia de Manuel Sánchez Fernández.



Figura 29 – FARO Focus^{3D} X 330 Laser Scanner.
Fonte: Fotografia de Manuel Sánchez Fernández.

O levantamento foi realizado com uma configuração exclusiva do *Laser Scanner* da FARO, com parâmetros de resolução 1/4 e qualidade 4x, que correspondem a um varrimento de 10240 x 4267 pontos, obtido com uma duração aproximada de 11 minutos e com um espaçamento entre pontos de 6.14 milímetros a 10 metros de distância ao sensor (Figura 30).



Figura 30 – Parâmetros de resolução adoptados no levantamento.
Fonte: Laser Scanner FARO Focus^{3D} X 330.

O levantamento de cada edificação referida consistiu em vários estacionamentos do instrumento, até se obter a total cobertura do espaço, resultando tantos *scans* (varrimentos) quantos o número de estacionamentos. Portanto, cada *scan* dá origem a uma nuvem de pontos (Figura 31) que tem associado o sistema de coordenadas do *Laser Scanner*.



Figura 31 – Exemplo de visualização de um *scan* obtido no levantamento com *Laser Scanner*.

Fonte: *Laser Scanner FARO Focus^{3D} X 330*.

Para a materialização do sistema de referência, possibilitando que as coordenadas obtidas para os pontos da nuvem estejam todas referidas ao mesmo sistema de referência, e para permitir, posteriormente, a ligação espacial entre os vários *scans* (pré-processamento dos dados) utilizaram-se alvos esféricos (Figura 32 e Figura 33) de diâmetro conhecido (14.5 e 25 centímetros), bem distribuídos no espaço para se obter uma boa geometria da rede e bem visíveis, para facilitar o pré-processamento dos dados (orientação espacial das nuvens de pontos). Os alvos de 14.5 centímetros de diâmetro foram colocados a distâncias entre 15 e 18 metros do *Laser Scanner* e os alvos de 25 centímetros de diâmetro a distâncias entre 28 e 30 metros. Os alvos esféricos foram posicionados de forma a poderem ser vistos e correspondidos entre cada dois *scans*, tendo-se garantido um mínimo de 3 alvos comuns não colineares.



Figura 32 – Alvo esférico de diâmetro de 14.5 cm usado no levantamento.

Fonte: Elaboração própria.



Figura 33 – Alvo esférico de diâmetro de 25 cm usado no levantamento.

Fonte: Elaboração própria.

No decurso do levantamento, o *Laser Scanner* realiza, seguidamente ao varrimento por *laser*, o varrimento fotográfico através de uma câmara digital interna com HDR, permitindo a coloração da nuvem 3D por associação de cada ponto da nuvem a um *pixel* da imagem melhorada, por aplicação das equações de colinearidade.

A Figura 34, abaixo apresentada, demonstra o percurso planeado e realizado para o levantamento das várias dependências do Mosteiro.

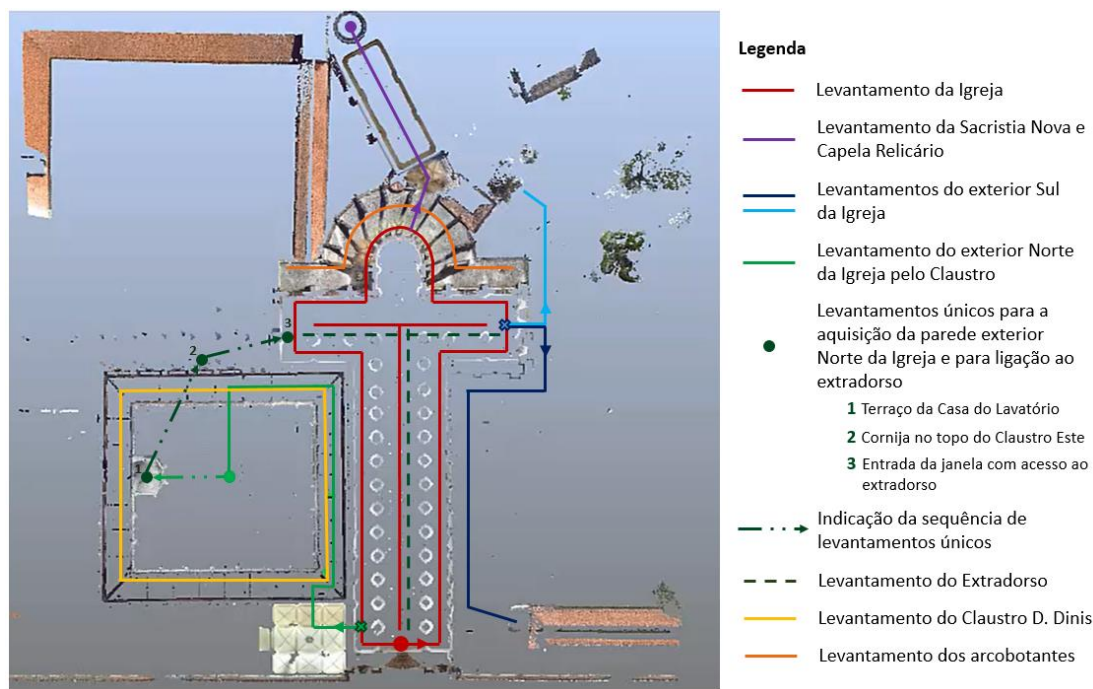


Figura 34 – Percurso realizado para o levantamento de algumas dependências do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: Elaboração própria.

A intenção inicial na realização deste levantamento consistia, unicamente, na Igreja do Mosteiro de Alcobaça, contemplando o seu interior, exterior e o extradorso, sendo para tal necessário aceder a diversas outras edificações do Mosteiro, nomeadamente, a Sala dos Reis, o Claustro de D. Dinis, a Sacristia Nova e a Capela Relicário apenas para a ligação das nuvens. Contudo, considerando as possibilidades e vantagens desta tecnologia pretendeu-se, a pedido da Direcção do Mosteiro de Alcobaça, completar o varrimento das edificações referidas, com especial foco no Claustro de D. Dinis e na Capela Relicário.

Para o levantamento do Mosteiro de Alcobaça foi realizado um total de 131 *scans*.

A Figura 35 mostra a nuvem de pontos colorida do Mosteiro de Alcobaça, obtida por aplicação do TLS.

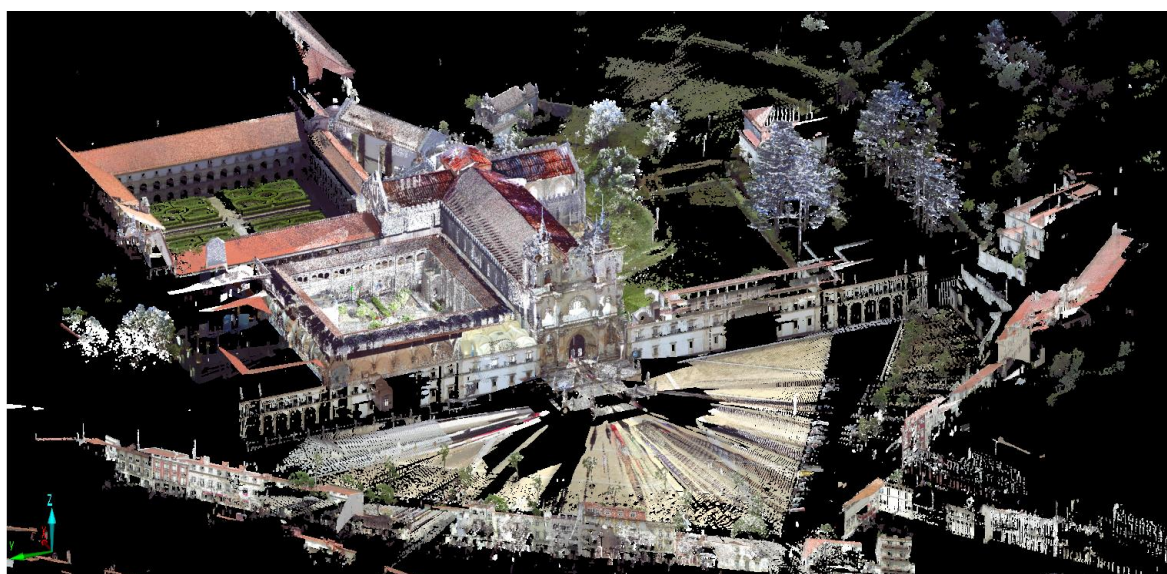


Figura 35 – Nuvem de pontos colorida do Mosteiro de Alcobaça obtida por aplicação do TLS.

Em relação à Capela Relicário optou-se por se realizar um projecto isolado (Figura 36).

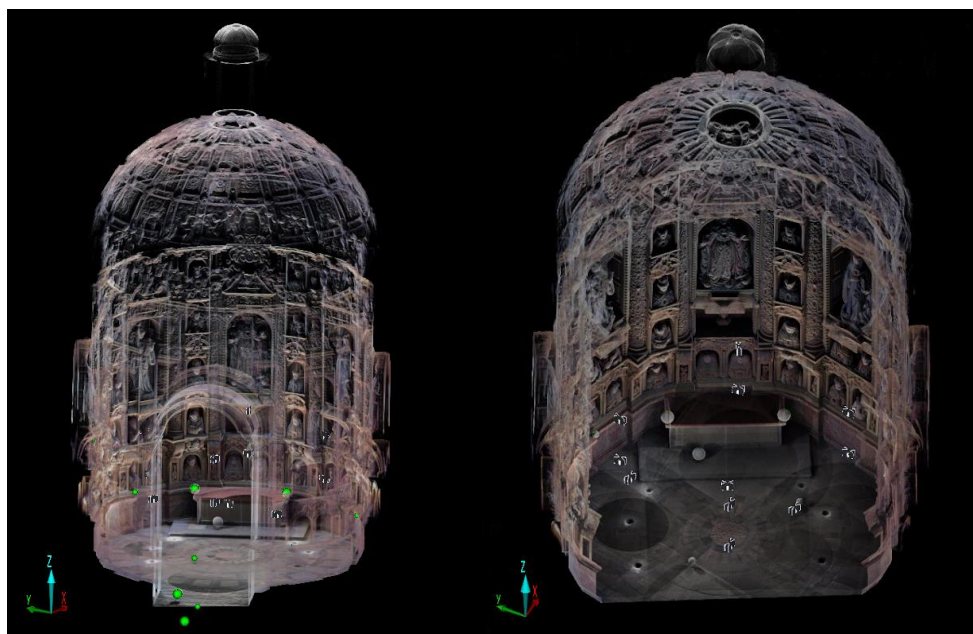


Figura 36 – Levantamentos da Capela Relicário (projecto isolado) a diferentes alturas e posições (símbolos do *Laser Scanner*).

O levantamento da Capela Relicário consistiu na realização de um total de 12 *scans* a 3 alturas díspares (4 tomas por cada altura), nomeadamente, a partir do solo (tripé regular), a 2 m de altura (tripé telescópico) e a 4 m de altura (tripé telescópico em máxima extensão). Para as diferentes alturas foi mantida, sempre que possível, a mesma posição planimétrica do *Laser Scanner* para o varrimento.

Para este projecto, tendo em consideração o objectivo do levantamento e a possibilidade de ligação dos *scans* através dos alvos esféricos, não foi realizada uma georreferenciação. Esta teria sido obrigatória caso não houvesse intervisibilidade entre *scans* e/ou se pretendesse um posicionamento global do levantamento, por exemplo, para o relacionar com a rede hidráulica, que se estende por quilómetros.

A segunda etapa corresponde ao processamento dos dados, que compreende o pré-processamento e o processamento dos dados propriamente dito. O pré-processamento consiste no registo das nuvens de pontos, isto é, relacionar espacialmente as nuvens de pontos entre si, determinando-se a posição e orientação relativa de cada *scan* em relação ao outro através do reconhecimento das referências (alvos esféricos e planos) comuns entre os *scans*. O objectivo é formar um bloco único, contendo a forma tridimensional do Mosteiro. Esta operação consiste numa transformação espacial de semelhança entre as nuvens sucessivas, apoiada nos pontos comuns. A fase de processamento dos dados contempla as seguintes operações: verificação da existência de zonas de sombra e de inexistência de pontos; edição, segmentação e limpeza da nuvem de pontos; preparação do modelo do Mosteiro e criação de seccionamentos necessários à obtenção dos resultados pretendidos.

O pré-processamento e processamento dos dados foi realizado através dos *softwares* *FARO Scene* [FARO, 2013] e *3D Reshaper* [Technodigit, 2018], num computador ASUS com processador Intel® Core™ i7-6700 CPU 3.40 GHz, memória RAM de 64 GB, disco rígido de 1TB e sistema operativo Windows 10 de 64-bit.

A última etapa está associada aos resultados, nomeadamente, a obtenção de cortes e orto-imagens da nuvem de pontos, superfícies 3D interpoladas a partir da nuvem de pontos, curvas de nível, modelos digitais de superfície normalizados (nDSM) e geração de modelos 3D.

O levantamento por TLS ao Mosteiro de Alcobaça e o pré-processamento dos dados foram realizados em colaboração com o grupo de investigação NEXUS da Universidade da Extremadura de Espanha.

Apresenta-se a metodologia descrita sob a forma de um fluxograma (Figura 37).

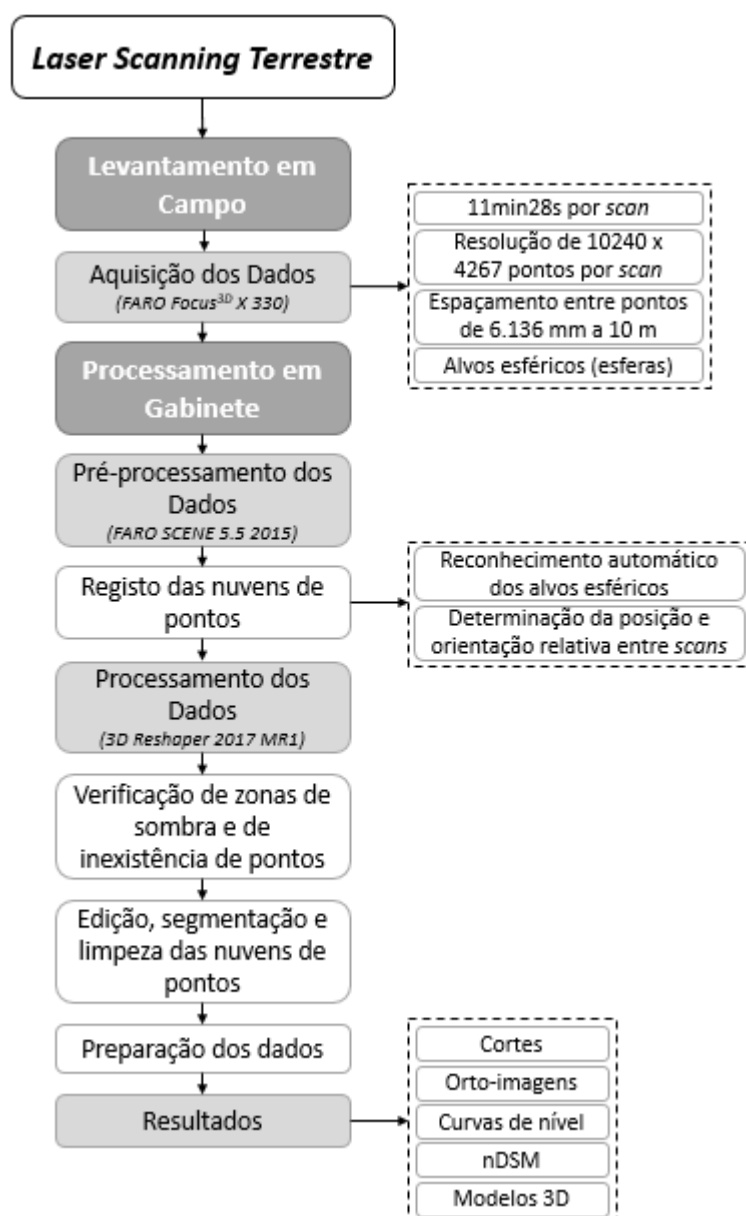


Figura 37 – Fluxograma da metodologia adoptada para o TLS.

5.2 Fotogrametria – Restituição Múltipla Automática

À semelhança do subcapítulo anterior, a metodologia seguidamente apresentada pretende fazer cumprir os objectivos definidos no subcapítulo 1.3, sendo aplicada somente aos principais túmulos da Igreja do Mosteiro de Alcobaça – túmulos de D. Pedro I e D. Inês de Castro, e compreende três principais etapas: levantamento em campo, processamento dos dados e resultados.

A primeira etapa – levantamento em campo, consistiu em adquirir sistematicamente fotografias digitais dos túmulos referidos com uma resolução de 3872 x 2176 *pixels* e com uma grande área de sobreposição entre si, através da câmara fotográfica digital *Sony Alpha DSLR-A230* (Figura 38).



Figura 38 – Câmara fotográfica digital *SONY ALPHA DSLR-A230*.
Fonte: Pinterest, 2018.

Apresenta-se, na Tabela 2, as especificações de maior relevância da câmara fotográfica digital *SONY ALPHA DSLR-A230*, utilizada na aquisição das fotografias.

Tabela 2 – Especificações da câmara fotográfica digital *SONY ALPHA DSLR-A230*.
Fonte: SONY, 2018.

ESPECIFICAÇÕES DA CÂMARA DIGITAL <i>SONY ALPHA DSLR-A230</i>	
Resolução máxima	3872 x 2592 <i>pixels</i>
<i>Pixels</i> efectivos	10.2 <i>Megapixels</i>
Tipo de sensor	CCD
Dimensão do sensor	23.5 x 15.7 mm (APS-C)
ISO	ISO100 – 3200
Sistema de focagem	Contínuo, Fotografia única, Automático, Manual
Distância focal	18 – 55 mm
Gama de velocidade do Obturador	1/4000 s
Peso	450 g
Dimensão da câmara	128 x 97 x 67.5 mm

As fotografias foram obtidas em torno do objecto (Figura 39), sob diferentes fiadas e para as quais se foi adaptando a distância focal (f) tendo em consideração a distância entre o ponto

estação e o objecto. Tanto quanto possível, a distância focal foi mantida ao longo de cada fiada.

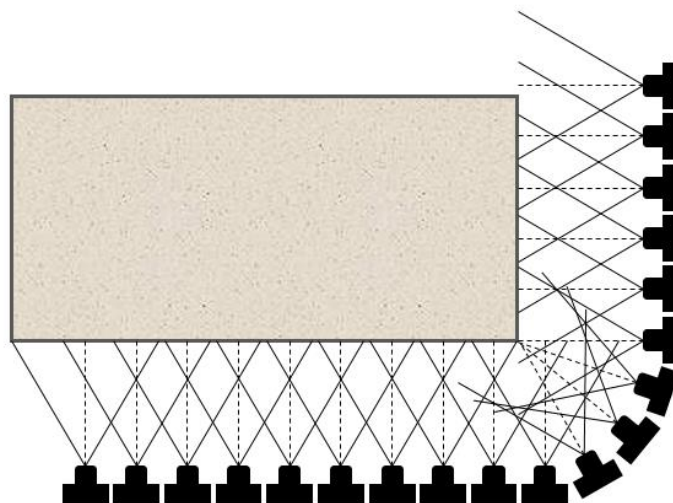






Figura 39 – Disposição dos pontos estação na tomada de fotos dos túmulos.

Fonte: Elaboração própria.

Foram consideradas quatro fiadas distintas, em torno de cada túmulo, para a obtenção das fotografias, segundo diferentes posições e distâncias focais (Figura 40).

Fiadas em torno do túmulo:

-  Fiada 1 (55 mm) – eixo fotográfico perpendicular às faces laterais do túmulo (zonas superiores)
-  Fiada 2 (24 mm) – eixo fotográfico perpendicular às faces laterais do túmulo
-  Fiada 3 (24 mm) – eixo fotográfico com inclinação de 45° em relação às faces laterais e topo do túmulo (utilização de escadote de 1.90 m)
-  Fiada 4 (18 mm) – eixo fotográfico perpendicular ao topo do túmulo (utilização de escadote de 1.90 m e tripé em máxima extensão)

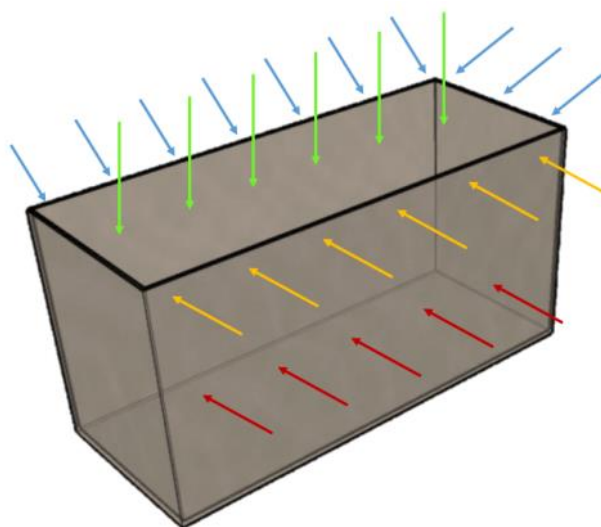


Figura 40 – Exemplificação das diferentes fiadas realizadas na tomada de fotos, em torno dos túmulos de D. Pedro I e D. Inês de Castro.

Fonte: Elaboração própria.

Como exemplificado na Figura 40, as fiadas 1 ($f = 55$ mm) e 2 ($f = 24$ mm) foram efectuadas a partir do chão, com o eixo fotográfico perpendicular às faces laterais dos túmulos. Para a fiada 3 ($f = 24$ mm) as fotografias foram adquiridas a partir de um escadote, com altura aproximada de 1.90 metros, e com uma inclinação aproximada de 45° relativa às zonas superiores das faces do túmulo. No caso da fiada 4 ($f = 18$ mm) recorreu-se à utilização do escadote e de um tripé fechado e esticado na máxima extensão (Figura 41), tendo sido obtidas fotografias por retardamento de 10 s e segundo uma orientação perpendicular do eixo fotográfico em relação ao topo do túmulo.



Figura 41 – Aquisição fotográfica com recurso a um escadote e tripé em máxima extensão.
Fonte: Fotografia da Prof. Paula Redweik.

Para a geração dos modelos 3D dos túmulos foram realizadas coberturas de 644 fotografias para o de D. Pedro I e de 1387 fotografias para o de D. Inês de Castro.

A segunda etapa – Processamento dos dados, contempla um pré-processamento das fotografias (as fotografias de cada cobertura foram processadas em conjunto por um processamento rápido e específico para a concepção de modelos 3D), a geração de uma nuvem de pontos (a nuvem de pontos é gerada com uma precisão e densidade de pontos 3D superior à produzida no processo inicial), respectiva limpeza cuidada (tendo em conta a presença significativa de ruído e para que o modelo 3D a gerar represente, o melhor possível, a realidade do objecto) e a reconstrução de superfícies a partir dessa nuvem de pontos.

A terceira e última etapa – Resultados, resume-se à obtenção dos modelos 3D dos túmulos, com superfícies e texturas, através da geração de uma malha constituída por triângulos adjacentes que tem por base a nuvem de pontos (*mesh*). A malha é originada por aplicação de um algoritmo de reconstrução de superfícies (algoritmo de Poisson [Kazhdan *et al.*, 2006]) e é interpolada a partir dos pontos da nuvem. Como resultados adicionais foram produzidas ortofotos das faces dos túmulos e, ainda, um holograma do túmulo de D. Inês de Castro.

Para a concretização da restituição dos túmulos (desde o processamento das fotografias à concepção dos modelos) recorreu-se ao *software Pix4D* [Pix4D, 2018], onde as fotografias de cada cobertura foram processadas em conjunto.

Apresenta-se a metodologia descrita sob a forma de um fluxograma (Figura 42).

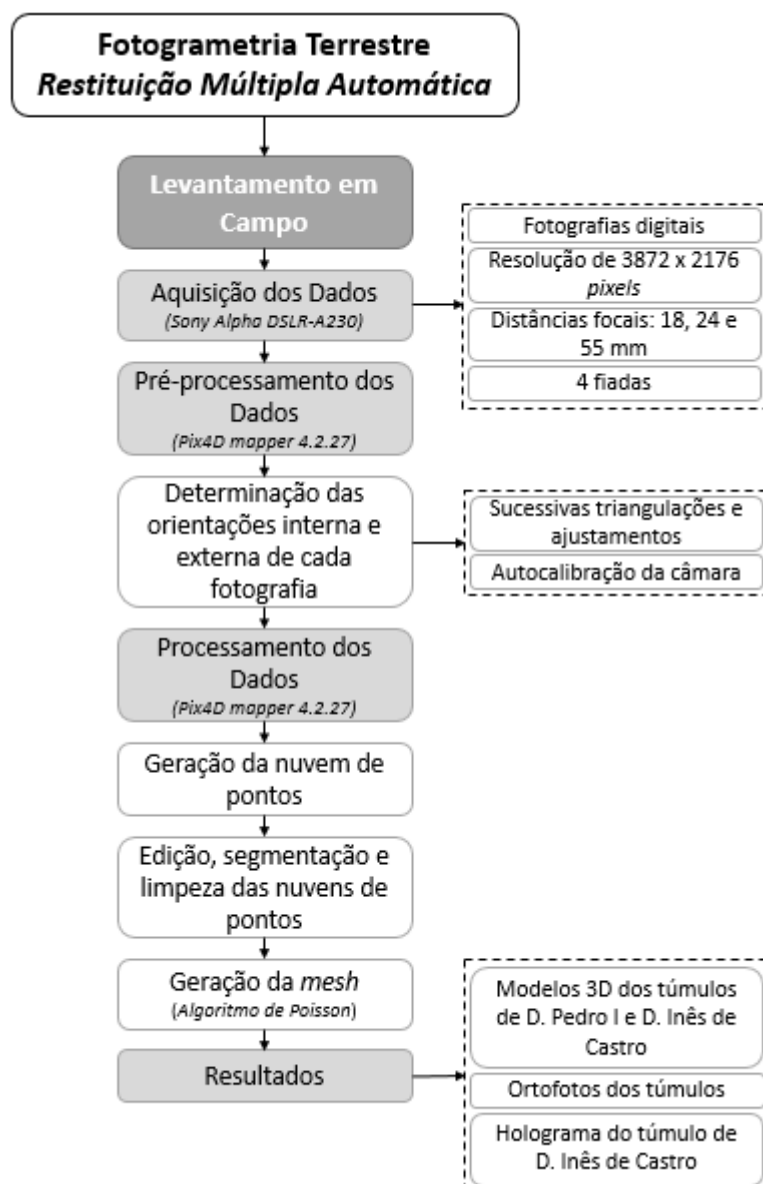


Figura 42 – Fluxograma da metodologia adoptada para a Técnica de Restituição Múltipla Automática.

6. PROCESSAMENTO DOS DADOS

6.1 Laser Scanning Terrestre

Para que os objectivos definidos possam ser satisfeitos é necessário proceder ao processamento dos dados já adquiridos. Para tal, foram percorridas duas fases: pré-processamento e processamento dos dados.

6.1.1 Pré-processamento dos dados

O pré-processamento é uma fase essencial, uma vez que os *scans* não têm qualquer relação espacial entre si e, como tal, é necessário realizar o alinhamento das respectivas nuvens. Este alinhamento é possível recorrendo a alvos esféricos comuns (três no mínimo) entre cada dois *scans*. Esta é chamada a fase de registo das nuvens de pontos, que consiste em fazer reconhecer as referências (alvos esféricos e planos) comuns entre *scans*. Este reconhecimento foi realizado automaticamente e controlado manualmente, através do *software FARO Scene* [FARO, 2013], em que os alvos esféricos e os planos são usados para determinar a posição e orientação relativa de cada *scan* em relação ao outro. Os planos de referência foram desenhados em todas as nuvens em que figuravam e para as quais os alvos esféricos não eram suficientes, particularmente, no exterior da Igreja (Figura 43).



Figura 43 – Exemplo de um plano de referência (reticulado verde) desenhado em duas nuvens de pontos.

A precisão e qualidade do registo das nuvens de pontos depende de nuvem para nuvem, tendo sido obtido um erro médio de 0.9 mm e um erro máximo de 6 mm entre cada duas nuvens de pontos. Apresenta-se, na Figura 44, um excerto do relatório de registo das nuvens correspondente ao erro máximo obtido (nuvens de pontos AINave029 e AINave033).

```

*****
* Registration Report *
*****

General Information
-----
Scan Quantity          : 131
Participating Scans    : AlNav000, AlNav001, AlNav002, AlNav003, AlNav004, AlNav005, AlNav006, AlNav007, AlNav008, AlNav011, AlNav012,
AlNav014, AlNav015, AlNav016, AlNav017, AlNav019, AlNav020, AlNav021, AlNav022, AlNav023, AlNav024, AlNav025, AlNav026, AlNav027,
AlNav028, AlNav029, AlNav030, AlNav031, AlNav032, AlNav033, AlNav034, AlNav035, AlNav036, AlNav037, AlNav038, AlNav039, AlNav040,
AlNav041, AlNav042, AlNav043, AlNav044, AlNav045, AlNav046, AlNav047, AlNav048, AlNav049, AlNav050, AlNav053, AlNav054, AlNav055,
AlNav058, AlNav059, AlNav060, AlNav061, AlNav062, AlNav063, AlNav064, AlNav065, AlNav066, AlNav067, AlNav068, AlNav069, AlNav070,
AlNav071, AlNav072, AlNav073, AlNav074, AlNav075, AlNav076, AlNav077, AlNav078, AlNav079, AlNav080, AlNav081, AlNav082, AlNav083,
AlNav084, AlNav085, AlNav086, AlNav088, AlNav089, AlNav090, AlNav091, AlNav092, AlNav094, Alcobaca_2017_000, Alcobaca_2017_001,
Alcobaca_2017_002, Alcobaca_2017_003, Alcobaca_2017_004, Alcobaca_2017_005, Alcobaca_2017_006, Alcobaca_2017_007, Alcobaca_2017_008,
Alcobaca_2017_009, Alcobaca_2017_010, Alcobaca_2017_011, Alcobaca_2017_012, Alcobaca_2017_013, Alcobaca_2017_014, Alcobaca_2017_015,
Alcobaca_2017_016, Alcobaca_2017_017, Alcobaca_2017_018, Alcobaca_2017_019, Alcobaca_2017_020, Alcobaca_2017_022, Alcobaca_2017_023,
Alcobaca_2017_024, Alcobaca_2017_025, Alcobaca_2017_026, Alcobaca_2017_027, Alcobaca_2017_029, Alcobaca_2017_030, Alcobaca_2017_031,
Alcobaca_2017_033, Alcobaca_2017_034, Alcobaca_2017_035, Alcobaca_2017_036, Alcobaca_2017_037, Alcobaca_2017_038, Alcobaca_2017_039,
Alcobaca_2017_10000, Alcobaca_2017_10001, Alcobaca_2017_10002, Alcobaca_2017_10003, Alcobaca_2017_10004, Alcobaca_2017_10005,
Alcobaca_2017_10006, Alcobaca_2017_10007, Alcobaca_2017_10008
Total Correspondences   : 5518

Scan
-----
Scan Name              : AlNav029
Inclinometer Usage     : yes
Position [m]           : 10.643297 23.272969 65.898378
Orientation Axis        : 0.0037606868 -0.0055183647 -0.9999777038
Angle [°]              : 92.426810
Point Distance [mm]     : 2.105537
Number of Correspondences : 78

Correspondences
| Scan 1 || Scan 2 || Tension |
/ Monasterio_a_octubre_2017/Completo/2016/Lu_23_05_2016/AlNav029/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere130 / Monasterio_a_octubre_2017/Completo
/2016/Lu_23_05_2016/AlNav008/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere23 0.0009
/ Monasterio_a_octubre_2017/Completo/2016/Lu_23_05_2016/AlNav029/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere130 / Monasterio_a_octubre_2017/Completo
/2016/Lu_23_05_2016/AlNav011/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere32 0.0034
/ Monasterio_a_octubre_2017/Completo/2016/Lu_23_05_2016/AlNav029/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere130 / Monasterio_a_octubre_2017/Completo
/2016/Lu_23_05_2016/AlNav003/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere265 0.0024
/ Monasterio_a_octubre_2017/Completo/2016/Lu_23_05_2016/AlNav029/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere131 / Monasterio_a_octubre_2017/Completo
/2016/Lu_23_05_2016/AlNav030/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere141 0.0031
/ Monasterio_a_octubre_2017/Completo/2016/Lu_23_05_2016/AlNav029/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere131 / Monasterio_a_octubre_2017/Completo
/2016/Lu_23_05_2016/AlNav031/Sphere151 0.0040
/ Monasterio_a_octubre_2017/Completo/2016/Lu_23_05_2016/AlNav029/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere131 / Monasterio_a_octubre_2017/Completo
/2016/Lu_23_05_2016/AlNav033/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere157 0.0060
/ Monasterio_a_octubre_2017/Completo/2016/Lu_23_05_2016/AlNav029/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere132 / Monasterio_a_octubre_2017/Completo
/2016/Lu_23_05_2016/AlNav027/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere118 0.0035
/ Monasterio_a_octubre_2017/Completo/2016/Lu_23_05_2016/AlNav029/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere132 / Monasterio_a_octubre_2017/Completo
/2016/Lu_23_05_2016/AlNav028/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere124 0.0032
/ Monasterio_a_octubre_2017/Completo/2016/Lu_23_05_2016/AlNav029/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere132 / Monasterio_a_octubre_2017/Completo
/2016/Lu_23_05_2016/AlNav030/AutoFeatures/SphereContainer/Sphere144 0.0007

```

Figura 44 – Erro máximo de registo de nuvens de pontos obtido.

A união das várias nuvens de pontos foi efectuada segundo um sistema de referência arbitrário (XYZ) sendo, posteriormente, exportadas em formato *.fls*.

Pelo objectivo do levantamento e dado que foi sempre possível ligar os *scans* sucessivos, não foi realizada uma georreferenciação. Assim, todas as nuvens de pontos estão num só sistema de coordenadas cartesiano, mas de origem e orientação arbitrária, à excepção do eixo do Z que é vertical, visto o *Laser Scanner* estar verticalizado em todos os estacionamentos (Figura 45).

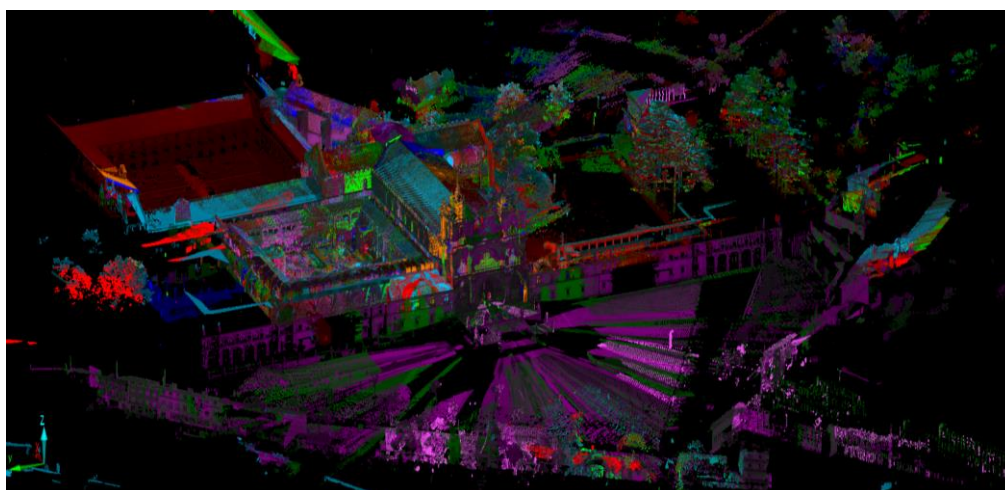


Figura 45 – Nuvens de pontos do Mosteiro de Alcobaça obtidas por aplicação do TLS (cada cor corresponde a um scan).

6.1.2 Processamento dos dados

A fase seguinte corresponde ao processamento efectivo dos dados, tendo-se recorrido, para tal, ao *software 3D Reshaper* [Technodigit, 2018]. As nuvens de pontos foram importadas para este *software* sem ter sido realizada qualquer redução do número de pontos.

O processamento das nuvens de pontos incidiu, especialmente, na verificação e tratamento dos dados, nomeadamente:

- verificação das zonas de sombra (criadas por oclusões por objectos) e outras zonas de inexistência de pontos;
- edição e limpeza das nuvens de pontos;
- preparação dos dados para obtenção dos produtos finais pretendidos (recorrendo, por exemplo, à segmentação e a caixas de seccionamento).

A limpeza das nuvens de pontos (Figura 46), realizada separadamente para cada *scan*, envolveu a remoção manual de pontos erróneos, devido à existência de ruído (pontos gerados por reflexões, poeiras e objectos), de pontos correspondentes a objectos indesejáveis (casas, árvores, pessoas, entre outros), e de pontos muito distantes do instrumento que estariam eivados de maior incerteza.

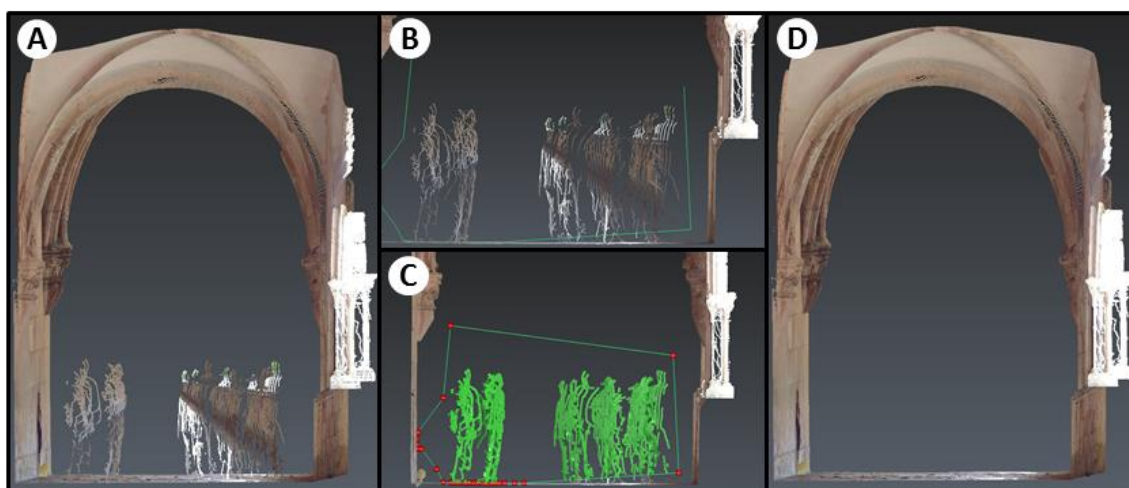


Figura 46 – Exemplo de edição na nuvem de pontos: A) nuvem original; B) e C) zona seleccionada e eliminada; D) nuvem editada.

A limpeza é uma acção essencial para a obtenção de resultados com qualidade.

Para o caso particular do Claustro de D. Dinis foram apenas considerados os pontos pertencentes às 3 abóbadas centrais de cada *scan*, pelo que os restantes pontos foram excluídos devido à elevada incerteza associada (Figura 47).



Figura 47 – Exemplo dos pontos considerados num *scan* do claustro de D. Dinis: A) *Scan* completo; B) parte aproveitada a rosa.

Uma vez limpas as nuvens de pontos, procede-se à preparação dos dados para a consecução dos produtos finais pretendidos:

- ❖ **Cortes** – Para a obtenção de cortes a realizar nas edificações do Mosteiro de Alcobaça, recorreu-se a caixas de seccionamento (*clipping boxes*), posicionando-as na zona pretendida e escolhendo a espessura desejada. Estas caixas de seccionamento revelam, unicamente, os pontos que se encontram no seu interior (Figura 48).

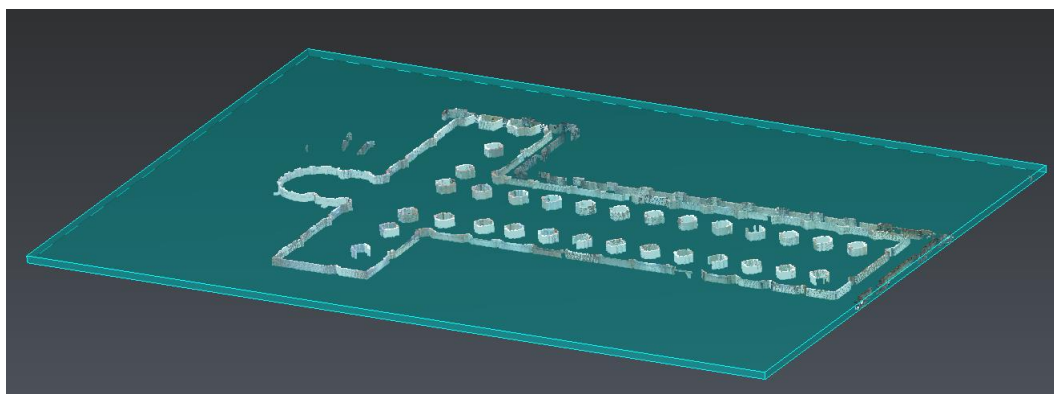


Figura 48 – Exemplo de uma *clipping box* com vista à obtenção de um corte em planta da Igreja.

- ❖ **Orto-imagens** – Pretende-se gerar orto-imagens dos cortes obtidos e das fachadas de determinadas edificações, a partir da nuvem de pontos. Para tal, foi seleccionada a vista pretendida da nuvem de pontos à obtenção da orto-imagem (planos *xy*, *yz* ou *xz* – Figura 49) e os parâmetros requeridos, designadamente, o tamanho do *pixel* da imagem (0.0025, 0.005 ou 0.05 metros) (Figura 50). As orto-imagens são produtos bidimensionais (2D), criadas a partir da projecção ortogonal dos pontos da nuvem (3D) sobre um plano pré-definido.

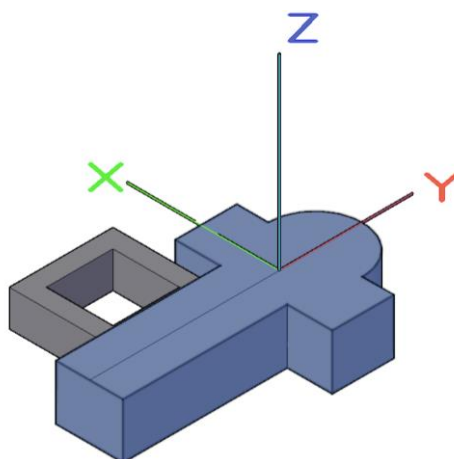


Figura 49 – Orientação da Igreja do Mosteiro de Alcobaça num referencial x,y,z.
Fonte: Elaboração própria.

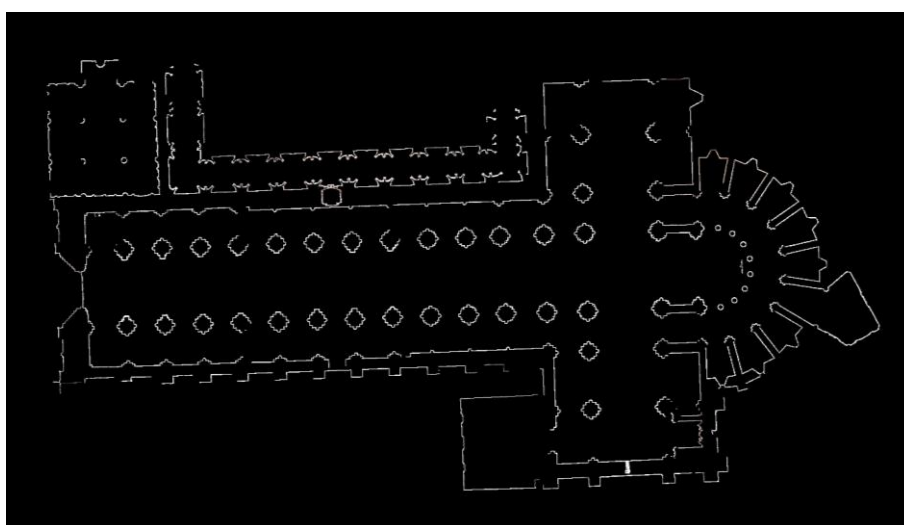


Figura 50 – Exemplo de uma orto-imagem com vista de topo (xy) e com tamanho do *pixel* de 0.05 m pela altura das mísulas piramidais.

- ❖ **Modelos 3D** – Para a concepção de modelos 3D é necessário gerar uma malha ou superfície composta por triângulos adjacentes (*mesh*). A ferramenta disponível no *software* permite criar uma *mesh 3D* a partir de uma ou mais nuvens de pontos. Segundo Monnier [2018], o algoritmo utilizado pelo *software* para a criação da *mesh* não é divulgado por questões de sigilo comercial, no entanto sabe-se que é compatível com a triangulação de Delaunay [Lo, 2015].

As nuvens de pontos correspondentes aos objectos a modelar tridimensionalmente apresentam zonas de ausência de pontos, pelo que existem vários elementos desses objectos incompletos. Por este motivo, e para minimizar o número de buracos na *mesh* (zonas sem representação do objecto), pretendeu-se reconstruir o mais possível todos os elementos incompletos. Através da replicação de fracções da nuvem de pontos representando elementos iguais ou semelhantes existentes em outros locais da nuvem, aplicando-lhes operações de transformação (simetria, translação e rotação) foi possível completar elementos em falta (Figura 51 e Figura 52). Esta solução só é aplicável a

elementos planos, elementos de arquitectura simétrica ou a elementos repetidos do objecto.



Figura 51 – Exemplo de reconstrução de um elemento da nuvem de pontos da Sacristia Nova por replicação e simetria de uma fracção respectiva: A) Fracção do elemento a replicar; B) Operação de simetria da fracção do elemento; C) União com a restante nuvem do elemento.



Figura 52 – Exemplo de um elemento da nuvem de pontos da Sacristia Nova a ser completado por operações de replicação, simetria, translação e rotação de uma fracção respectiva: A) Identificação da fracção do elemento a replicar; B) Fracção do elemento a replicar, aplicada uma operação de simetria; C) Fracção do elemento simétrica; D) Resultado – elemento completo através de operações de translação e rotação da fracção simétrica.

Nas situações em que existiam grandes áreas de inexistência de pontos do objecto a modelar tridimensionalmente (Sacristia Nova e Capela Relicário), optou-se por segmentar a nuvem de pontos em tantas nuvens quantas fossem necessárias, por zonas do objecto, e criar uma *mesh* para cada uma, vindo a obter-se vários modelos 3D que foram, posteriormente, unidos entre si. A união é realizada entre cada dois modelos e através da concepção da superfície em falta, a partir dos contornos adjacentes de cada modelo (Figura 54C, Figura 54I e Figura 55G).

A geração da *mesh* foi realizada em duas etapas, para as quais se definiram parâmetros essenciais à obtenção de um modelo com a melhor qualidade possível.

Na primeira etapa é obtida uma malha rugosa com triângulos regulares (Figura 53D, Figura 54F, Figura 55C e Figura 55D), para os quais é permitido definir o seu tamanho (adequado a cada modelo 3D deste projecto – para a Sacristia Nova e Capela Relicário considerou-se o valor de 0.05 m). Para evitar a existência de vários buracos na *mesh*

empregou-se, na maioria dos casos, a opção de tentativa de criação de uma *watertight mesh*. Em seguida verificou-se a possível existência de buracos na *mesh*, procedendo-se ao seu preenchimento.

Na segunda etapa é realizado o refinamento da *mesh* a partir da nuvem de pontos, isto é, os triângulos que compõem a superfície gerada são ajustados à nuvem, a fim de minimizar os desvios entre pontos e triângulos (Figura 53E, Figura 54B, Figura 54G e Figura 55E), e para o qual foram definidos os seguintes critérios:

- Interpolação de novos pontos – os pontos são criados com espaçamento uniforme (não existindo na nuvem de pontos), ajustando-se à nuvem de pontos, com vista a obter-se uma superfície mais suavizada;
- *Maxi space* – distância máxima entre dois vértices de um triângulo (de valor igual a 0.05 m para as abóbadas do Claustro de D. Dinis e 0.02 m para a Sacristia Nova e para a Capela Relicário);
- *Outlier point distance* de valor igual a 0.5 m para o Claustro de D. Dinis e 0.05 m para a Sacristia Nova e Capela Relicário;

Por fim a *mesh* foi colorida a partir das nuvens de pontos que a compõem (Figura 53F, Figura 54D, Figura 54H e Figura 54I). Para as situações de inexistência de pontos foi escolhida manualmente a cor que melhor se ajustasse.

Os modelos gerados para este projecto correspondem às abóbadas do Claustro de D. Dinis, Sacristia Nova e Capela Relicário.

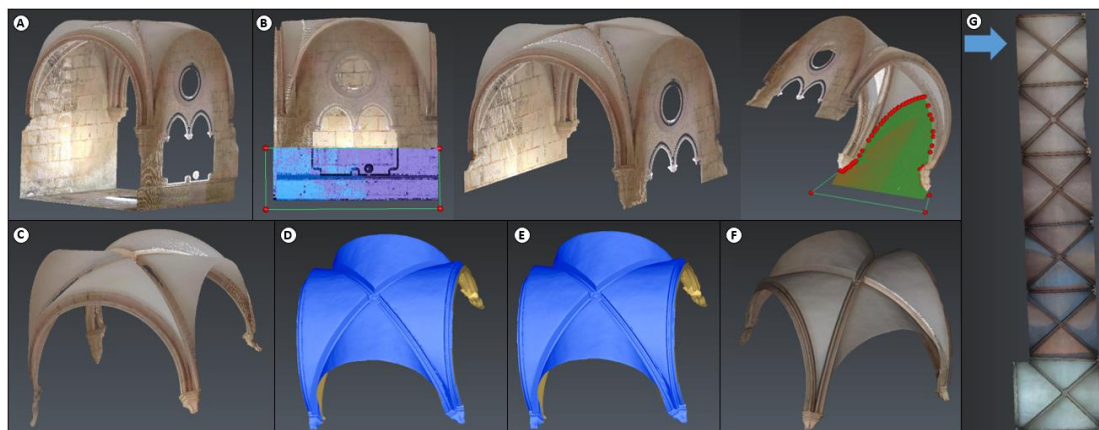


Figura 53 – Nuvem de pontos relativa à abóbada 21 do Claustro de D. Dinis e respectiva *mesh* gerada: A) Nuvem de pontos inicial do tramo; B) Edição da nuvem de pontos inicial com vista à obtenção da abóbada (desde as mísulas); C) Nuvem de pontos final; D) *Mesh* rugosa; E) *Mesh* refinada; F) *Mesh* colorida; G) Identificação da *mesh* da abóbada gerada.

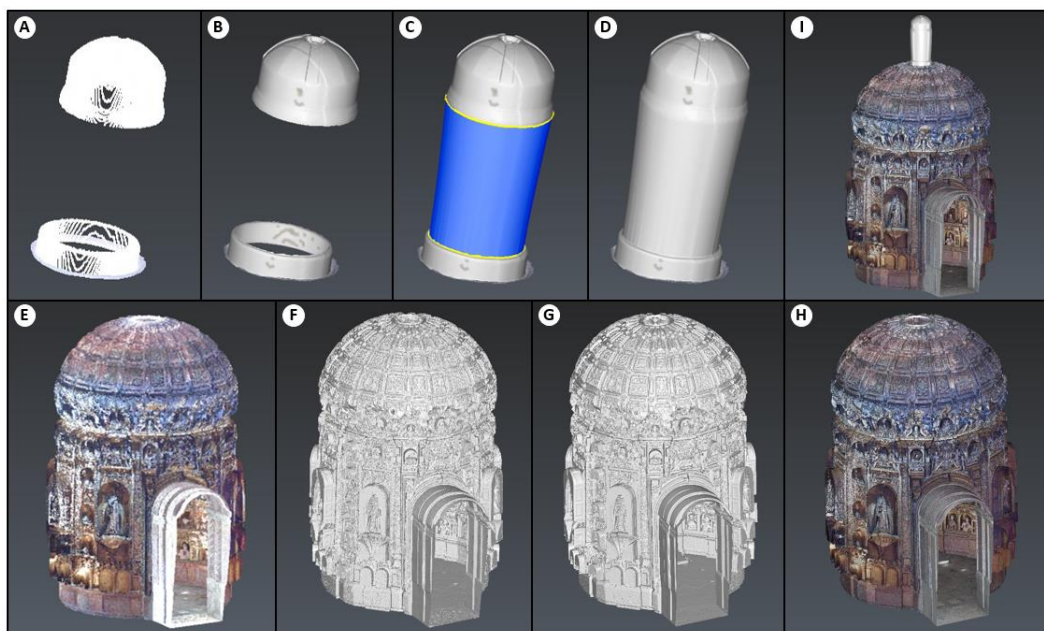


Figura 54 – Método de construção do modelo 3D da Capela Relicário: A) e E) Nuvem de pontos; B) e G) *Mesh* refinada; C) Superfície gerada para completude e união da *mesh* a partir dos contornos do objecto; D) e H) *Mesh* colorida; F) *Mesh* rugosa (inicial); I) *Mesh* completa colorida.

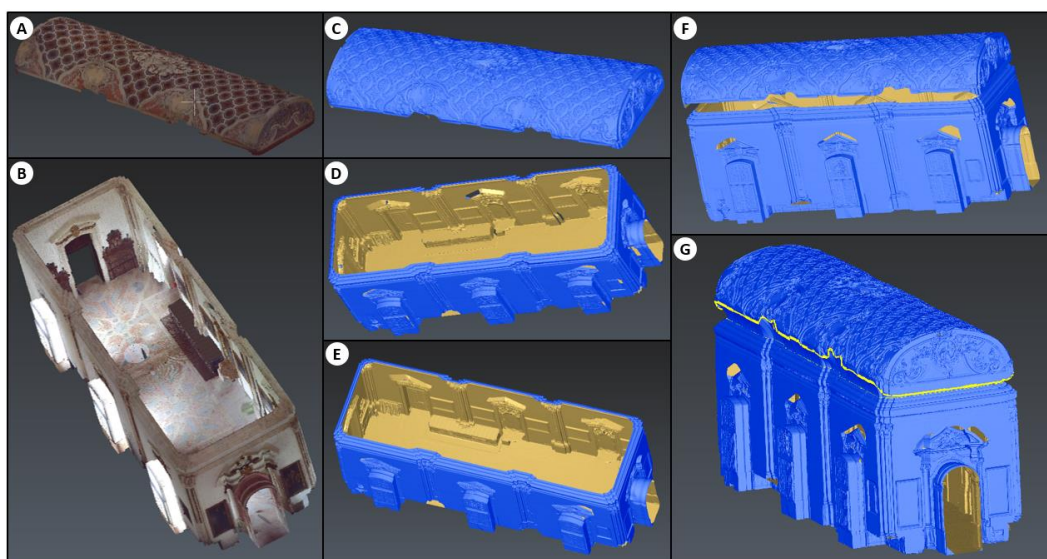


Figura 55 – Método de construção do modelo 3D da Sacristia Nova: A) e B) Nuvem de pontos; C) e D) *Mesh* 3D rugosa (inicial); E) *Mesh* 3D refinada; F) *Mesh* 3D refinada com superfície em falta; G) Superfície gerada para completude e união das *meshes* a partir dos contornos dos objectos.

- ❖ **Curvas de nível** – As curvas de nível, linhas que representam todos os pontos de uma superfície com a mesma cota ou altitude, foram calculadas ao longo do eixo Z, a partir de uma superfície 3D gerada a uma cota arbitrária (devido à não georreferenciação das nuvens de pontos), com os seguintes parâmetros:

- Intervalo entre as curvas secundárias = 0.05 metros
- Intervalo entre as curvas metras = 0.25 metros

Para este projecto, pretendeu-se obter as curvas de nível para as abóbadas do Claustro de D. Dinis.

- ❖ **nDSM** – Os modelos digitais de superfície normalizados, gerados pela cota mínima, permitem analisar o nivelamento das superfícies 3D, associando um valor de inspecção a cada vértice da *mesh* (obtida segundo uma cota arbitrária) e considerando a direcção do eixo do Z. Os nDSM foram aplicados às abóbadas do Claustro de D. Dinis com o objectivo de se identificar as zonas de maior e menor desnível.

6.2 Fotogrametria – Restituição Múltipla Automática

O processo da restituição múltipla automática concentra-se em duas fases essenciais, designadamente, a recuperação das orientações existentes entre a imagem e o objecto, no momento de aquisição da dita imagem (determinação das orientações internas e externas de cada fotografia), e a extracção da informação relevante do objecto para a sua reconstituição tridimensional. A ligação entre fotografias (orientação relativa) é realizada por pontos homólogos detectados automaticamente.

A restituição consiste, no caso presente, na geração de uma nuvem de pontos e na posterior geração de superfícies.

6.2.1 Pré-processamento dos dados (Processo inicial)

O processo inicial (Figura 56 e Figura 57) consistiu num processamento rápido (escala da imagem de 0.25, ou seja, $\frac{1}{4}$ do tamanho da imagem), específico para a concepção de modelos 3D, para avaliar a qualidade do conjunto de dados adquirido. No decurso deste processo são determinados e optimizados os parâmetros de orientação interna da câmara e os parâmetros de orientação externa das imagens relativamente a um referencial local, por sucessivas triangulações e ajustamentos incluindo a autocalibração da(s) câmara(s), até ser obtida uma reconstrução ideal da geometria de aquisição. Este processo baseia-se num grande conjunto de pontos homólogos (*tie points*), extraídos sucessivamente das imagens da cobertura. Para os túmulos de D. Pedro I e D. Inês de Castro foram calibradas e usadas para a reconstrução do modelo 777 de 810 fotografias e 1086 de 1087 fotografias, respectivamente.

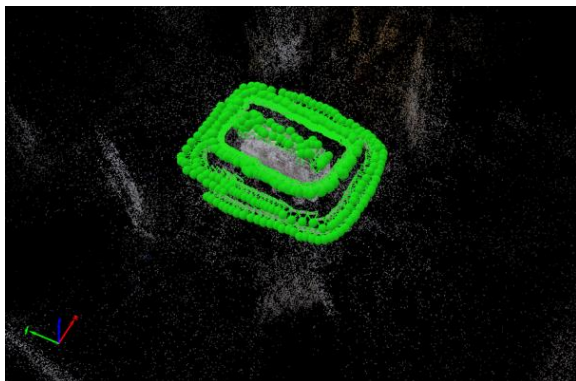


Figura 56 – Resultado da triangulação das fotografias do túmulo de D. Pedro I com representação dos pontos estação.

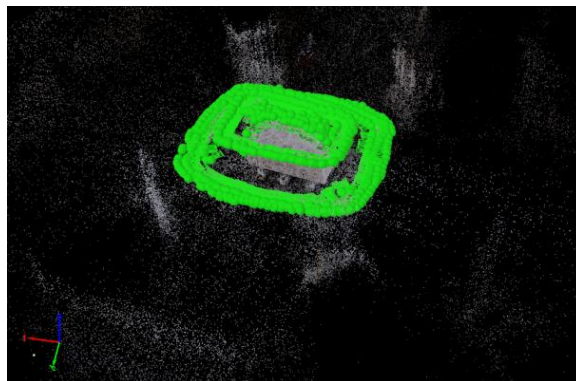


Figura 57 – Resultado da triangulação das fotografias do túmulo de D. Inês de Castro com representação dos pontos estação.

6.2.2 Processamento dos dados (Geração da nuvem de pontos)

A próxima etapa passa por gerar a nuvem de pontos (Figura 58 e Figura 59), com uma precisão e densidade de pontos 3D superior à produzida no processo inicial (*tie points*). A densidade da nuvem de pontos a determinar pelas fotografias depende da escala da imagem escolhida (1/2 – metade do tamanho original da imagem), da densidade de pontos 3D (*Optimal* – é calculado 1 ponto 3D para cada 8 *pixels*) e do número mínimo de correspondências por ponto 3D (3 – cada ponto 3D deverá estar identificado em pelo menos 3 imagens).



Figura 58 – Nuvem de pontos gerada para o túmulo de D. Pedro I.



Figura 59 – Nuvem de pontos gerada para o túmulo de D. Inês de Castro.

A nuvem de pontos obtida contém ruído e zonas que não pertencem ao objecto de estudo, sendo necessário proceder a uma limpeza cuidada para que o modelo 3D a gerar represente, o melhor possível, a realidade do objecto (Figura 60 e Figura 61).



Figura 60 – Nuvem de pontos do túmulo de D. Pedro I após edição.



Figura 61 – Nuvem de pontos do túmulo de D. Inês de Castro após edição.

Para a obtenção do modelo 3D do objecto é necessário gerar a *mesh*, isto é, uma malha ou superfície composta por triângulos adjacentes produzida tendo em conta a nuvem de pontos que lhe corresponde. A *mesh* foi produzida com alta resolução com 16 *octrees* (cada *octree* corresponde a uma subdivisão iterativa do volume espacial do projecto em 8 sub-regiões, organizadas numa estrutura em árvore) e com uma resolução de textura de 32768 x 32768 *pixels*, através do algoritmo de reconstrução de superfície de Poisson [Kazhdan *et al.*, 2006]. Os pontos da *mesh* não correspondem necessariamente aos pontos da nuvem, no entanto a distância da respectiva diferença é optimizada de modo a ser mínima. Após a definição de todos os parâmetros é gerado um modelo 3D, com superfícies e texturas.

7. RESULTADOS

7.1 Laser Scanning Terrestre

A partir de uma nuvem de pontos é possível obter produtos diversos. Considerando o objectivo deste projecto, interessa gerar produtos específicos que ajudem a compreender a evolução da arquitectura e dos métodos construtivos do Mosteiro de Alcobaça. Os produtos finais concebidos são bidimensionais ou tridimensionais e estão descritos nas secções que se seguem.

7.1.1 Claustro de D. Dinis

Para o Claustro de D. Dinis foram obtidos produtos que melhor satisfizessem os objectivos explanados e as exigências da Direcção do Mosteiro de Alcobaça e da DGPC, nomeadamente, orto-imagens, cortes longitudinais e transversais, superfícies 3D das abóbadas, curvas de nível das abóbadas e nDSM pela cota mínima.

7.1.1.1 Orto-imagens (Projecções ortogonais)

As orto-imagens são projecções ortogonais de cada ponto da nuvem num plano pré-definido, geradas a partir de seccionamentos nas nuvens de pontos 3D. Constituem um produto final bidimensional (2D) de escala homogénea, importante na obtenção / verificação de informação qualitativa (detalhe, textura, cor, material) e quantitativa (possibilidade de realização de medições) de forma rápida e precisa. Sobre a orto-imagem gerada é possível, se assim se pretender, realizar uma vectorização detalhada de elementos de interesse para o estudo à qual se aplica.

Como referido anteriormente foram obtidas orto-imagens (*pixel* de 2.5 mm) para cortes e fachadas exteriores (Figura 62 e Anexo A) e interiores do Claustro de D. Dinis, a partir da nuvem de pontos.



Figura 62 – Projecção ortogonal do exterior do claustro Este de D. Dinis.

As orto-imagens geradas, particularmente, para as fachadas do Claustro de D. Dinis são apresentadas sob analogia a uma caixa desdobrada, como representado na Figura 63.

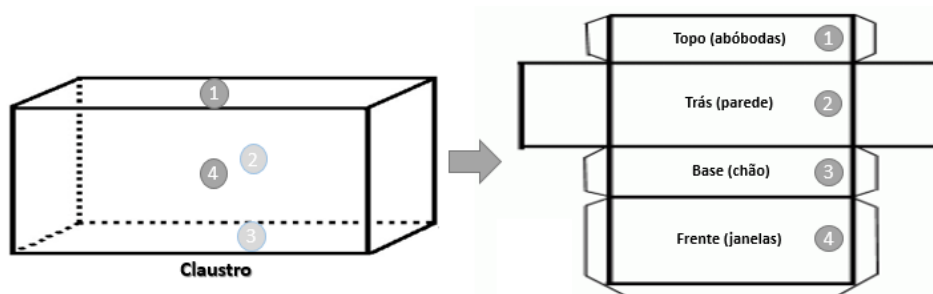


Figura 63 – Demonstração da exposição das orto-imagens geradas para as fachadas do Claustro de D. Dinis.
Fonte: Elaboração própria.

Conforme a demonstração acima exibida, apresenta-se na Figura 64 um exemplo de orto-imagens para o interior do claustro Norte. As orto-imagens para os restantes claustros encontram-se apresentadas no Anexo B.



Figura 64 – Projecção ortogonal do interior do claustro Norte de D. Dinis.

Realizando uma análise visual atenta às orto-imagens dos claustros (Figura 64 e Figura 128-Figura 130) verifica-se a existência de diferenças entre os claustros e, especialmente, entre as abóbodas, que no local não seria possível detectar.

7.1.1.2 Cortes

Os cortes aplicados ao Claustro de D. Dinis foram realizados directamente na nuvem de pontos, tendo em vista a obtenção de resultados com a maior precisão possível. Face ao âmag do projecto, considerou-se a obtenção de cortes longitudinais e transversais (planos verticais). A partir destes produtos é possível extrair informação numérica, realizando-se medições, e

informação visual, com a finalidade de se analisar e contextualizar histórica e arquitectonicamente as várias fases de construção.

Para cada corte foi, adicionalmente, efectuada uma orto-imagem, isto é, uma projecção ortogonal dos pontos.

Para facilitar a apresentação dos resultados, procedeu-se à divisão do Claustro de D. Dinis em quatro claustros, segundo a sua orientação geográfica, designadamente: claustros Norte, Sul, Este e Oeste.

Os cortes longitudinais foram efectuados por claustro e com o intuito de intersectarem o centro de todas as abóbadas correspondentes. Verificou-se, no entanto, que as abóbadas de cada claustro não se encontram alinhadas entre si, não sendo, por isso, possível o corte passar simultaneamente no centro de cada abóboda. Para uma melhor compreensão deste facto, foram realizados dois cortes longitudinais por claustro (Figura 65):

- Corte que intersecte o centro da primeira e última abóbadas;
- Corte que intersecte o centro da segunda e penúltima abóbadas.

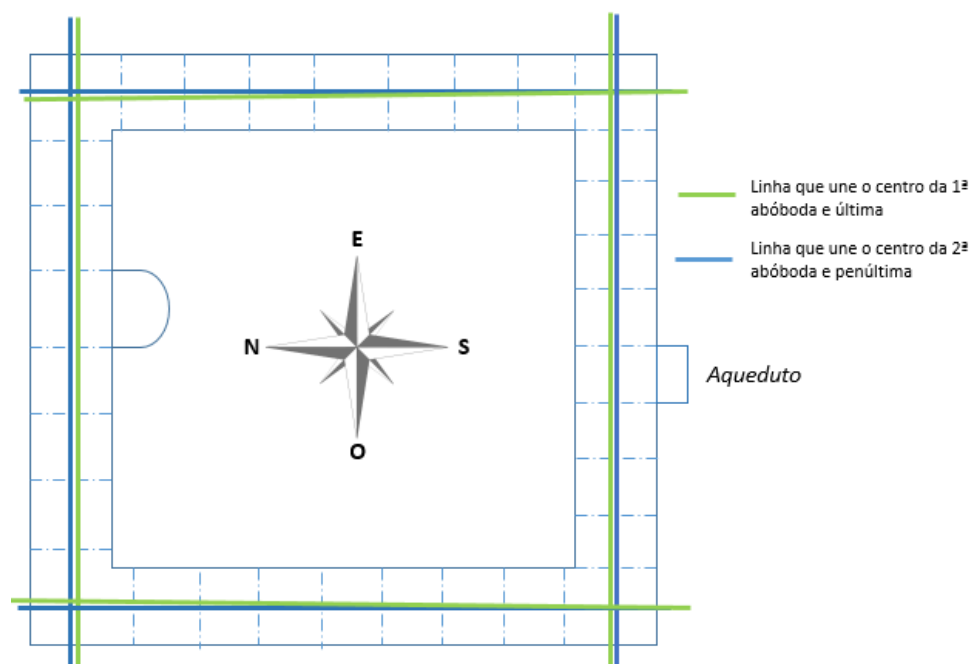


Figura 65 – Demonstração da realização dos cortes longitudinais no Claustro de D. Dinis.
Fonte: Elaboração própria.

A Figura 66, seguidamente apresentada, contempla os dois cortes mencionados e realizados para o claustro Norte. Os cortes para os restantes claustros encontram-se no Anexo C.

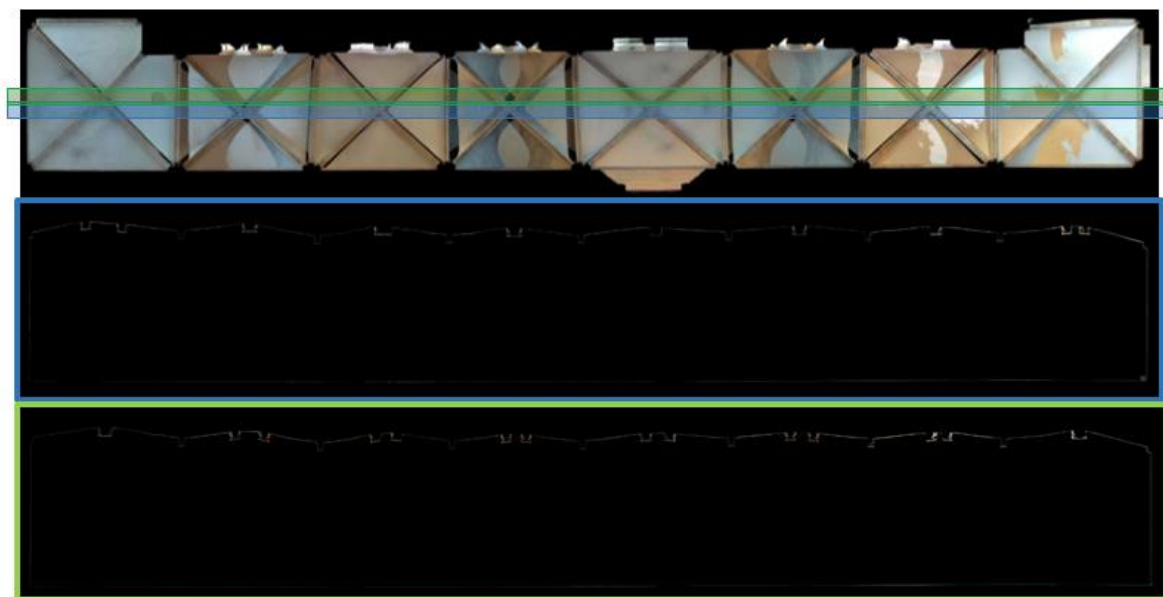


Figura 66 – Cortes longitudinais entre a segunda e penúltima abóbadas (azul) e entre a primeira e última abóbadas (verde) do claustro Norte de D. Dinis.

Fonte: Elaboração própria.

Os cortes transversais foram realizados ao longo de cada arco entre tramo (entre abóbadas) para cada claustro (Figura 67).

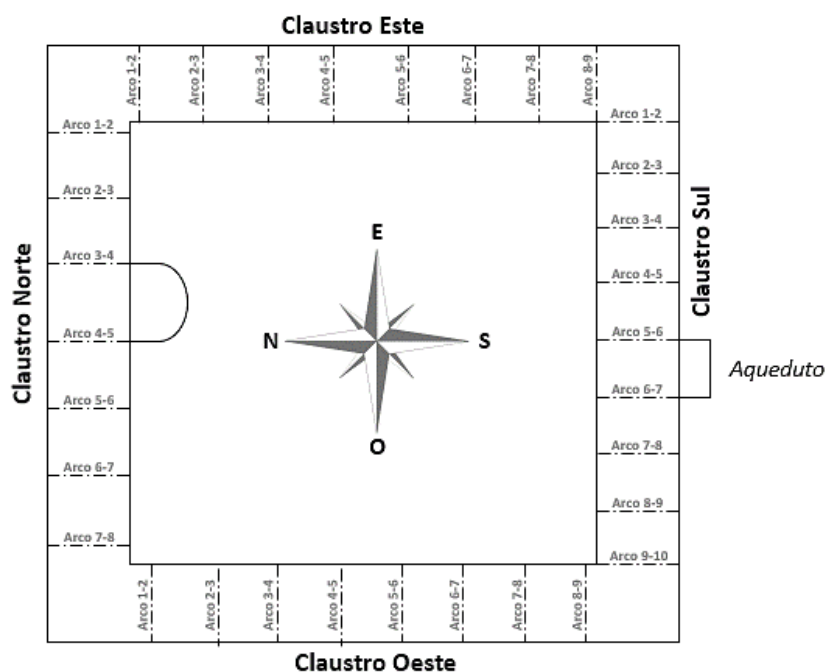


Figura 67 – Identificação dos cortes realizados ao longo de cada arco entre tramo.

Fonte: Elaboração própria.

Apresenta-se na Figura 68, a título exemplar, um corte transversal no claustro Este para o arco 2-3, com indicação de medições (altura e largura do arco) realizadas em ambiente 3D. Todos os cortes transversais efectuados, com as respectivas medições, estão exibidos no Anexo D.

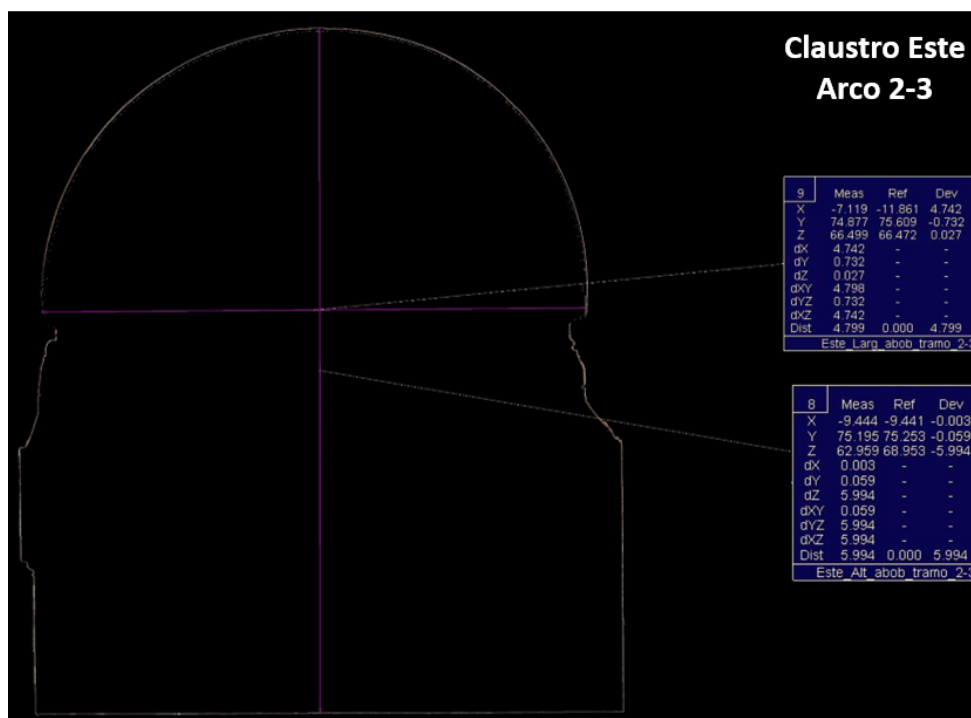


Figura 68 – Corte transversal do Arco 2-3 do claustro Este de D. Dinis.

O corte transversal apresentado assinala os valores por cada medição, referentes à posição, distância vertical ou horizontal medida e distância inclinada. Mais especificamente, os valores registados nos quadros da Figura 68 correspondem a:

- Coordenadas dos dois pontos seleccionados (X,Y,Z);
- Distância 3D entre os dois pontos em metros (Dev);
- Distância entre os dois pontos em cada direcção (dX, dY, dZ), isto é, ao longo de X, Y e Z;
- Distância entre os dois pontos em cada plano (dXY, dYZ, dXZ).

O arco 2-3 do claustro Este tem, aproximadamente, uma altura de 6.0 metros e uma largura de 4.7 metros.

7.1.1.3 Superfícies 3D

As superfícies 3D foram geradas para cada abóbada do Claustro de D. Dinis, a partir das nuvens de pontos, com o intuito de se obter mais informação acerca da sua construção e respectivas épocas, através da aplicação de curvas de nível e modelos digitais de superfície normalizados (nDSM).

A Figura 69 apresenta a identificação de cada abóbada do Claustro.

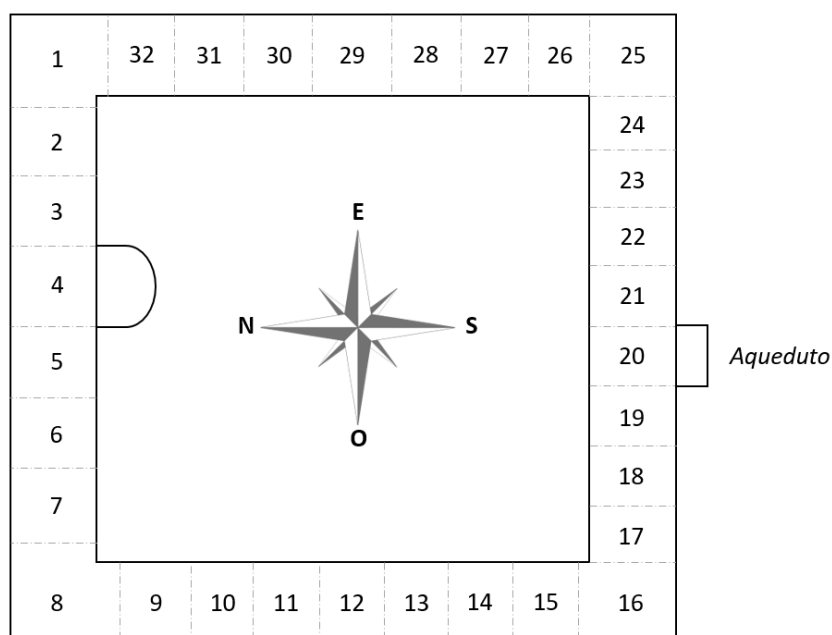


Figura 69 – Identificação das abóbadas do Claustro de D. Dinis.

Fonte: Elaboração própria.

Apresenta-se na Figura 70, a título exemplar, a superfície 3D gerada para a abóbada 21 do Claustro de D. Dinis e na Figura 71 as superfícies 3D geradas para todas as abóbadas do Claustro. Cada superfície 3D das abóbadas está representada no Anexo E.



Figura 70 – Superfície 3D gerada para a abóbada 21 do Claustro de D. Dinis.

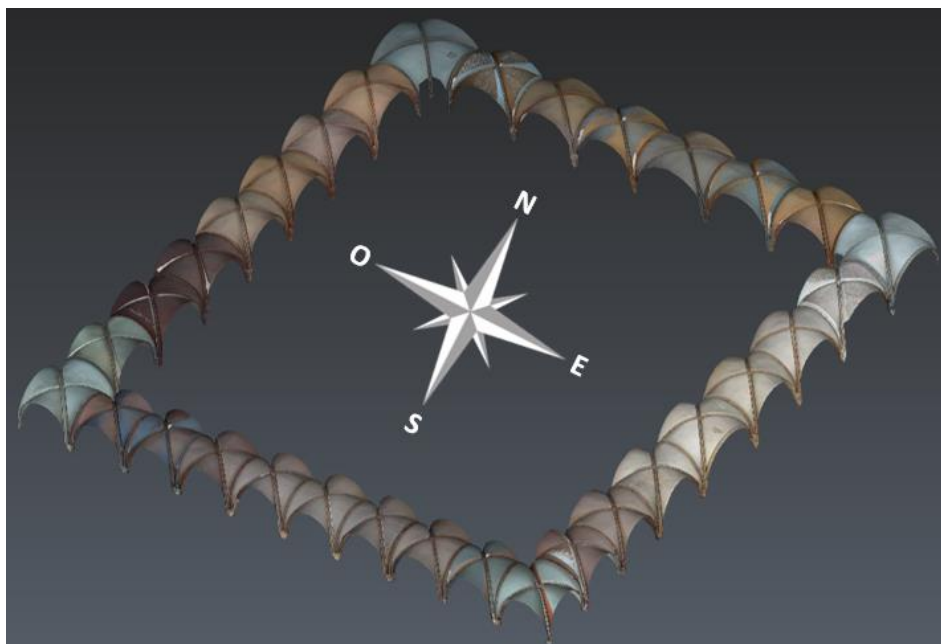


Figura 71 – Superfícies 3D geradas para as abóbadas do Claustro de D. Dinis.

7.1.1.4 Curvas de nível

As curvas de nível foram obtidas a partir das superfícies 3D geradas para as abóbadas do Claustro de D. Dinis (Anexo E). A título exemplar, apresenta-se na Figura 72 as curvas de nível referentes à abóbada 21, com indicação das curvas mestras (a vermelho) e secundárias (a azul). As cotas representadas correspondem a uma referência arbitrária, uma vez que não foi efectuada a georreferenciação das nuvens de pontos.

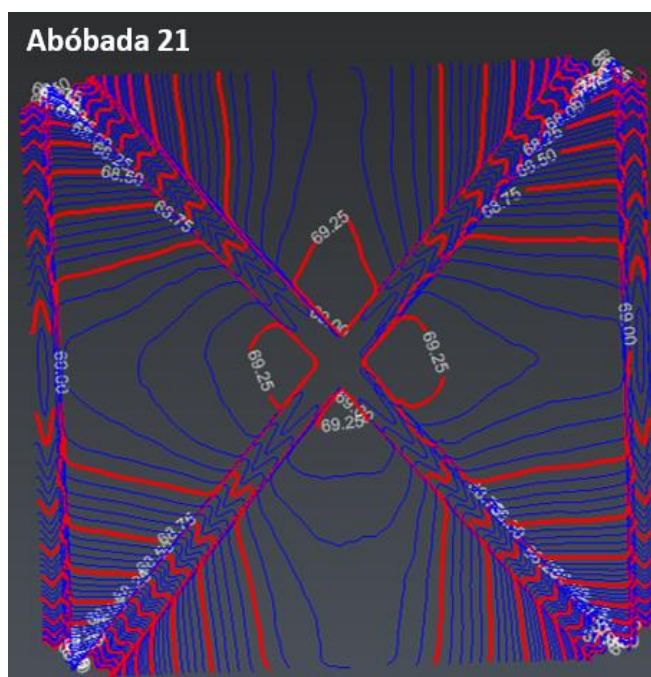


Figura 72 – Curvas de nível geradas a partir da superfície 3D da abóbada 21 do Claustro de D. Dinis.

7.1.1.5 Modelos digitais de superfície normalizados (nDSM)

Os modelos digitais de superfície normalizados (nDSM) foram gerados pela cota mínima, a partir da superfície 3D das abóbadas do Claustro de D. Dinis (Figura 73). Estes nDSM permitem identificar zonas de maior (a vermelho) e menor (a azul) desnível relativamente à cota mínima das abóbadas.

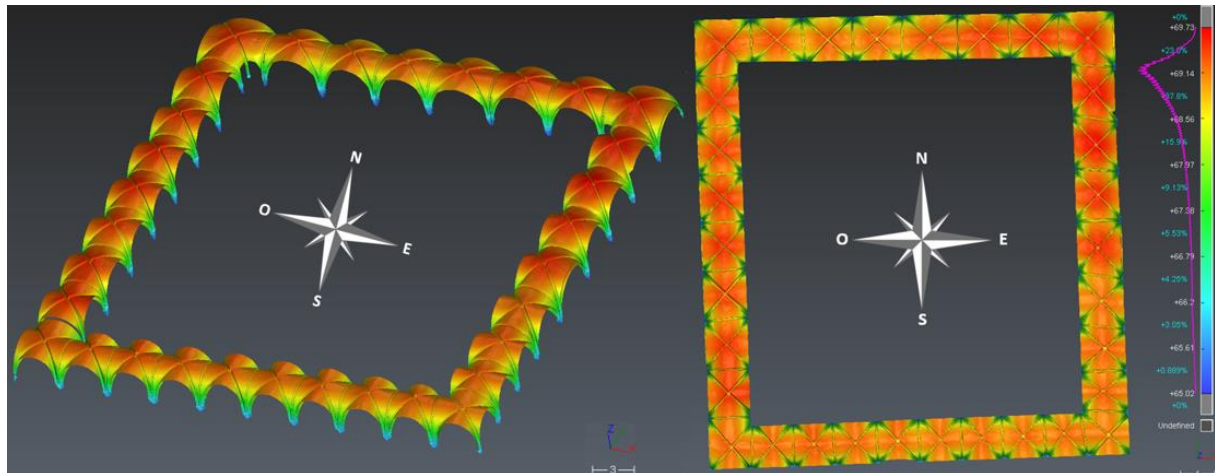


Figura 73 – nDSM das abóbadas do Claustro de D. Dinis, com cotas obtidas a partir de uma referência arbitrária.

A Figura 73 permite reconhecer a existência de diferentes fases de construção do Claustro, tanto pela variação do desnível (em RGB) como pelo realce da estrutura das abóbadas e respectivos tramos. Uma destas possíveis (e mais evidentes) fases, corresponde à transição do claustro Oeste para o claustro Sul, com continuação até à quarta abóbada, inclusive, do claustro Este.

7.1.2 Igreja do Mosteiro de Alcobaça

Para a Igreja do Mosteiro de Alcobaça foram obtidos produtos específicos segundo as exigências da Direcção do Mosteiro de Alcobaça e da DGPC, nomeadamente, orto-imagens e cortes longitudinais, transversais e em planta.

7.1.2.1 Cortes

Para a Igreja do Mosteiro de Alcobaça, em conformidade com o descrito anteriormente para o Claustro de D. Dinis, foram realizados cortes directamente na nuvem de pontos, tendo em vista a obtenção de resultados com a maior precisão possível para a extracção de informação numérica e visual, nomeadamente, cortes longitudinais, transversais (planos verticais) e em planta (planos horizontais). Para cada corte foi, adicionalmente, efectuada uma orto-imagem. Os cortes longitudinais (Figura 74 e Figura 75) foram efectuados por cada nave constituinte da Igreja e para cada braço do transepto, com o intuito de, em semelhança ao Claustro de D. Dinis, intersectarem o centro de todas as abóbadas correspondentes (L2 a L4 e L6 a L9) e,

ainda, o centro dos pilares entre naves (L10 e L11). Verificou-se, uma vez mais que, no geral, as abóbadas de cada nave não se encontram alinhadas entre si, não sendo, por isso, possível o corte passar simultaneamente no centro de cada abóboda. Tendo em conta esta problemática, foram realizados, adicionalmente, cortes longitudinais parciais, isto é, um corte por cada duas abóbadas, como demonstrado na Figura 75. Os cortes denominados de L1 e L5 na Figura 74 correspondem a projecções ortogonais das paredes exteriores da Igreja (Figura 104 e Figura 105).

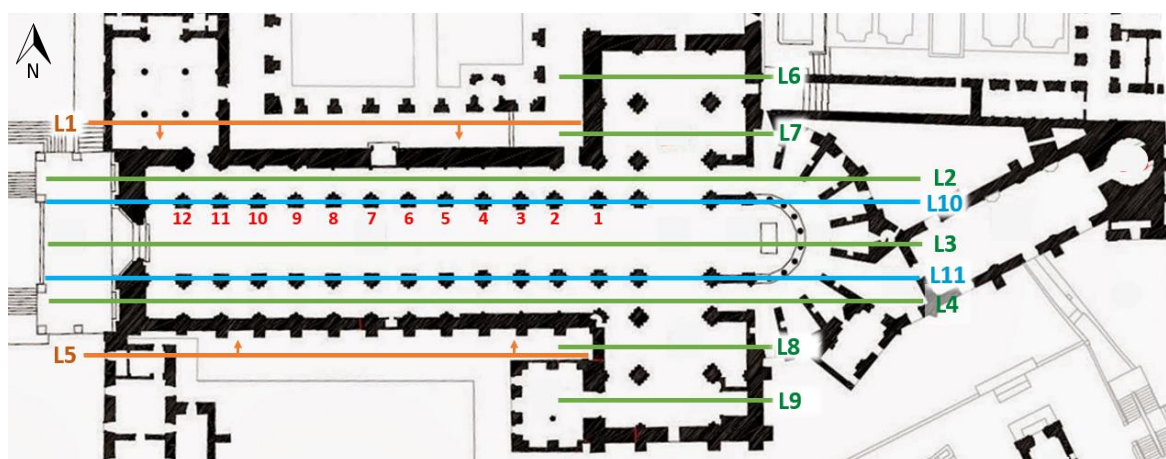


Figura 74 – Identificação dos cortes longitudinais realizados para a igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: Elaboração própria.

Fonte da planta: <https://arquitecturaycristianismo.files.wordpress.com/2016/08/15.jpg>.



Figura 75 – Identificação dos cortes longitudinais parciais realizados para a igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: Elaboração própria.

Fonte da planta: <https://arquitecturaycristianismo.files.wordpress.com/2016/08/15.jpg>.

Apresentam-se na Figura 76 e Figura 77, a título exemplar, cortes longitudinais para a Nave Central da Igreja (L3 e L3 parcial). Todos os cortes longitudinais efectuados estão exibidos no Anexo F.

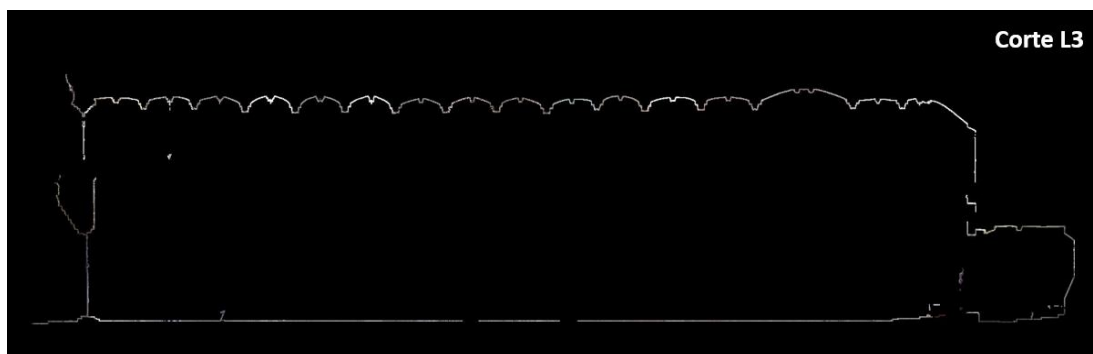


Figura 76 – Corte longitudinal na Nave Central da Igreja (L3) do Mosteiro de Alcobaça.

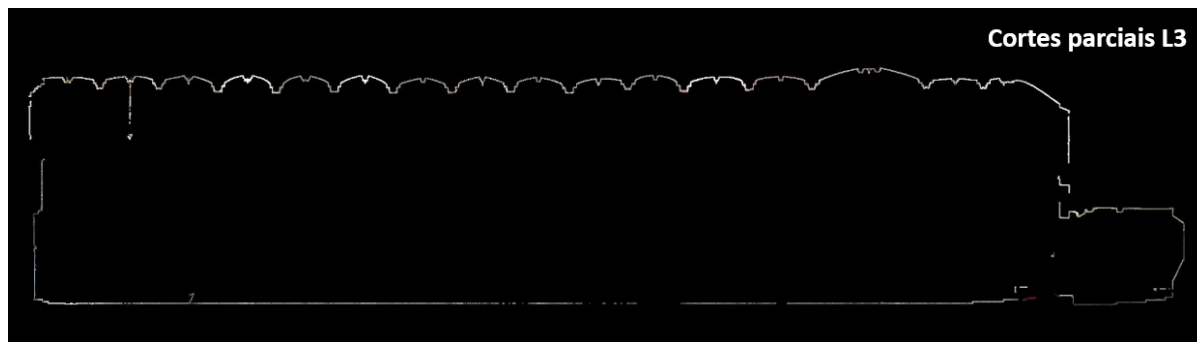


Figura 77 – Concatenação dos cortes longitudinais parciais realizados por cada duas abóbadas da Nave central da Igreja (cortes parciais L3) do Mosteiro de Alcobaça.

Os cortes parciais, como referido anteriormente, foram realizados por cada duas abóbadas, com o propósito de se obter cortes que intersectassem, efectivamente, o centro de cada abóbada, para uma análise mais objectiva e eficaz. A Figura 78 demonstra dois dos cortes parciais realizados e que são parte integrante da Figura 77.

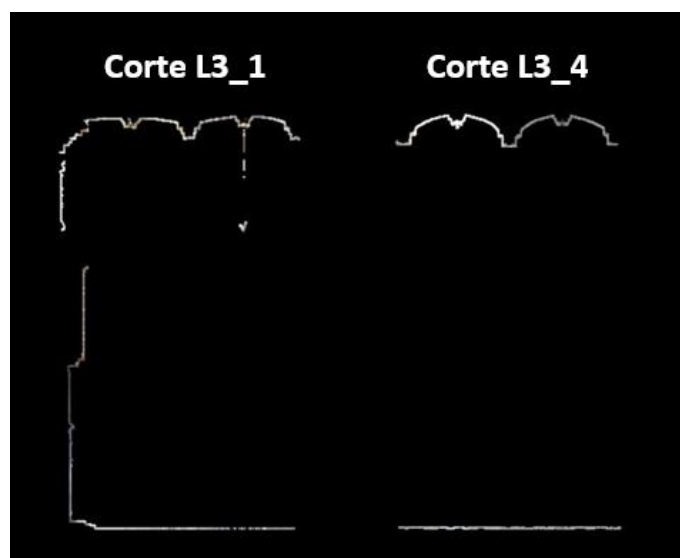


Figura 78 – Cortes longitudinais parciais realizados por cada duas abóbadas da Nave central da Igreja (cortes parciais L3_1 e L3_4) do Mosteiro de Alcobaça.

Em relação aos cortes transversais (Figura 79), executaram-se cortes intersectando as abóbadas no respectivo centro e, a pedido da DGPC, entre os pilares 4 (T6_c), 9 (T11_c) e 11 (T13_c).

Particularmente, o corte transversal T1 (Figura 103) corresponde a uma projecção ortogonal da cabeceira da Igreja vista no sentido Oeste-Este.

Para todos os cortes transversais, à excepção do corte T1, considerou-se a inclusão do extradorso da Igreja (Figura 80 e Figura 81).

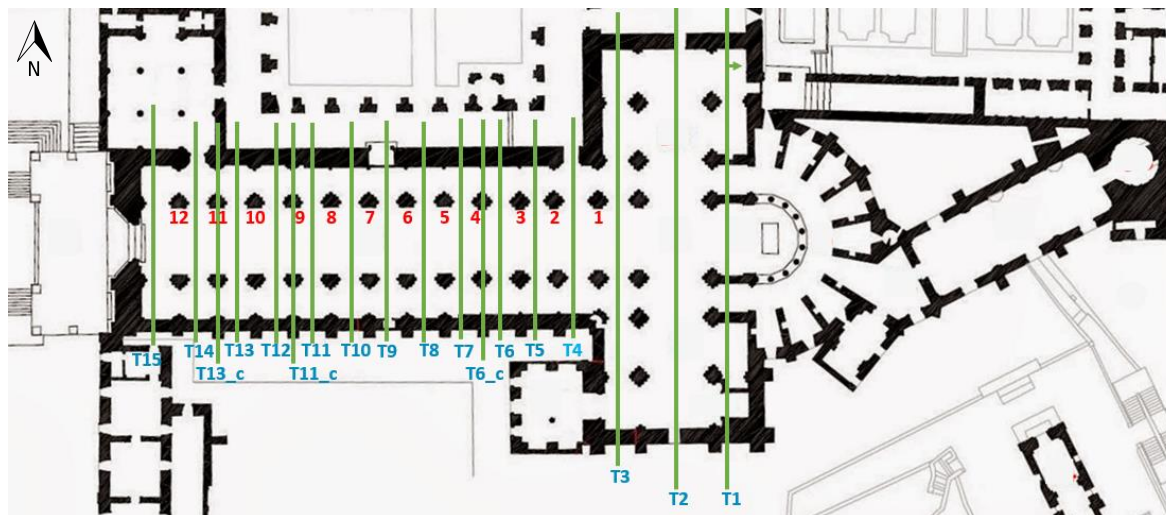


Figura 79 – Identificação dos cortes transversais realizados para a igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: Elaboração própria.

Fonte da planta: <https://arquitecturaycristianismo.files.wordpress.com/2016/08/15.jpg>.

As figuras seguidamente exibidas correspondem a exemplos, pelo que todos os cortes efectuados se encontram no Anexo G.

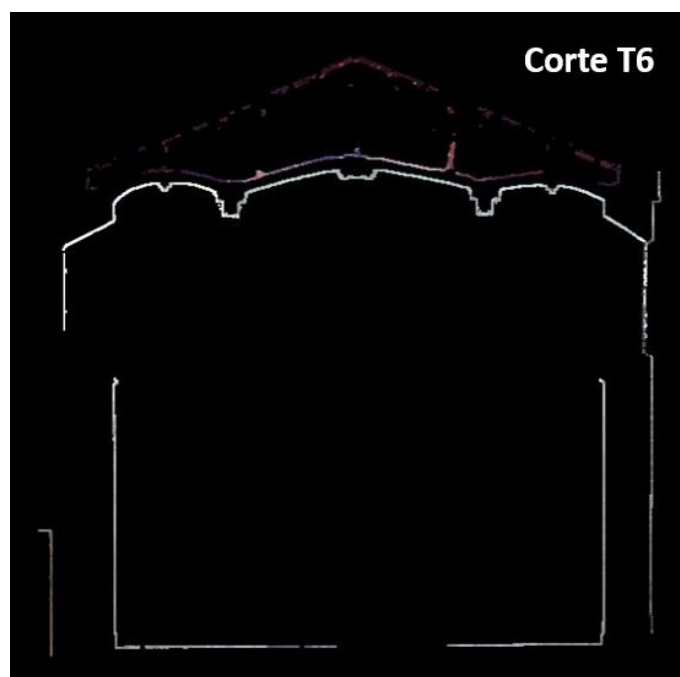


Figura 80 – Corte transversal T6 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

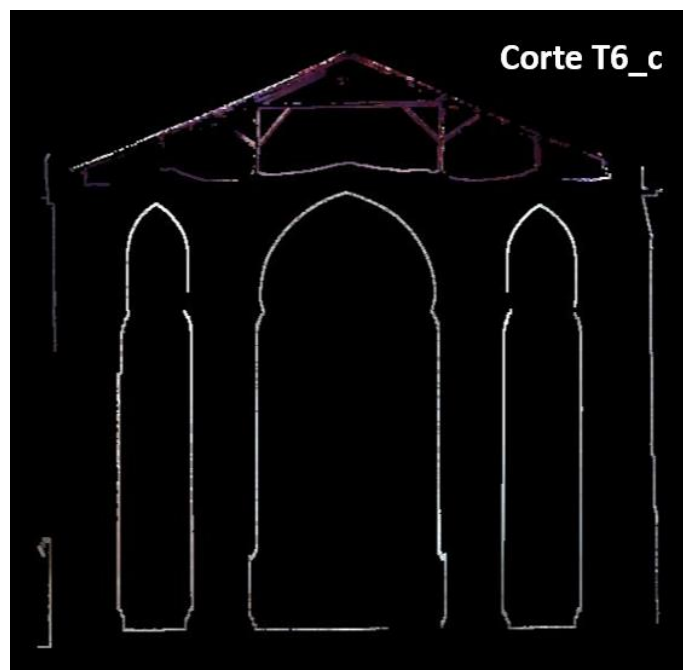


Figura 81 – Corte transversal entre pilares T6_c com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Para os cortes em planta foram respeitadas as instâncias da DGPC, pelo que foram efectuados cortes a partir de diferentes referências e alturas: cortes em planta pela base dos pilares da cabeceira (Figura 82 e Figura 83), pelas mísulas piramidais incluídas nos pilares centrais da Igreja do lado da Nave Central (Figura 84 a Figura 87), pela base das janelas Sul (Figura 88 e Figura 89) e pela base das abóbadas (

Figura 90 e Figura 91).

Para cada caso enunciado apresenta-se, abaixo, a demonstração de cada corte em planta e respectivo resultado.

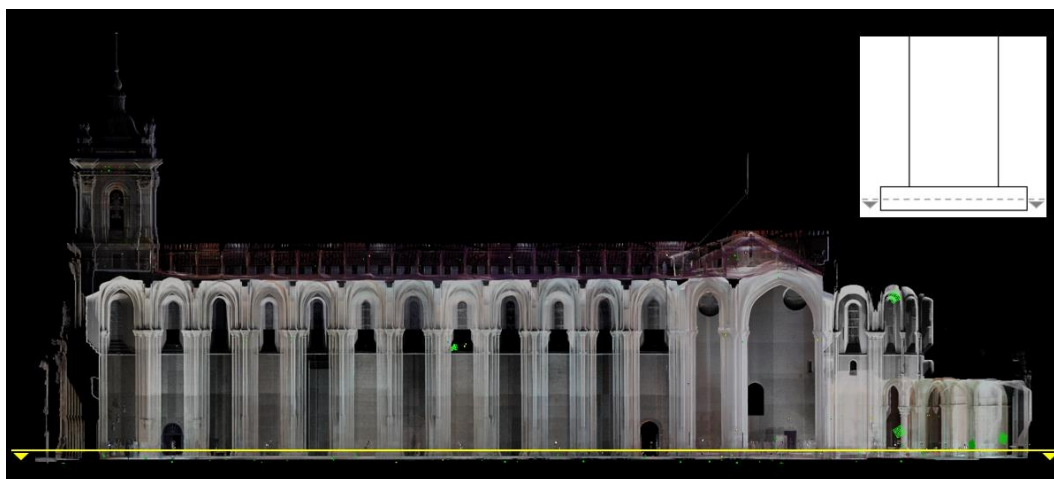


Figura 82 – Demonstração do corte em planta pela base dos pilares da cabeceira da Igreja.

Fonte: Elaboração própria.

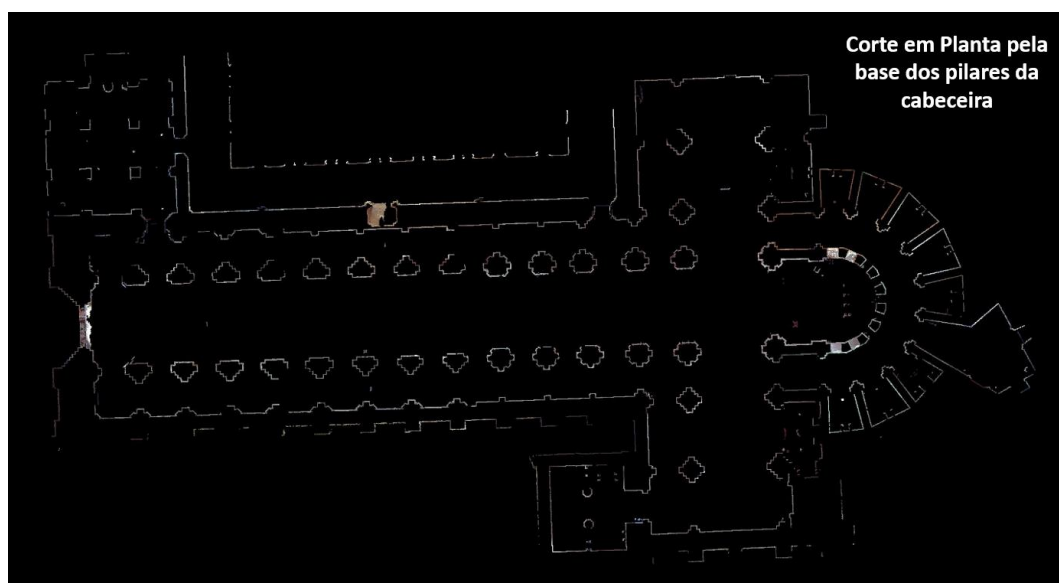


Figura 83 – Corte em planta pela base dos pilares da cabeceira da Igreja do Mosteiro de Alcobaça

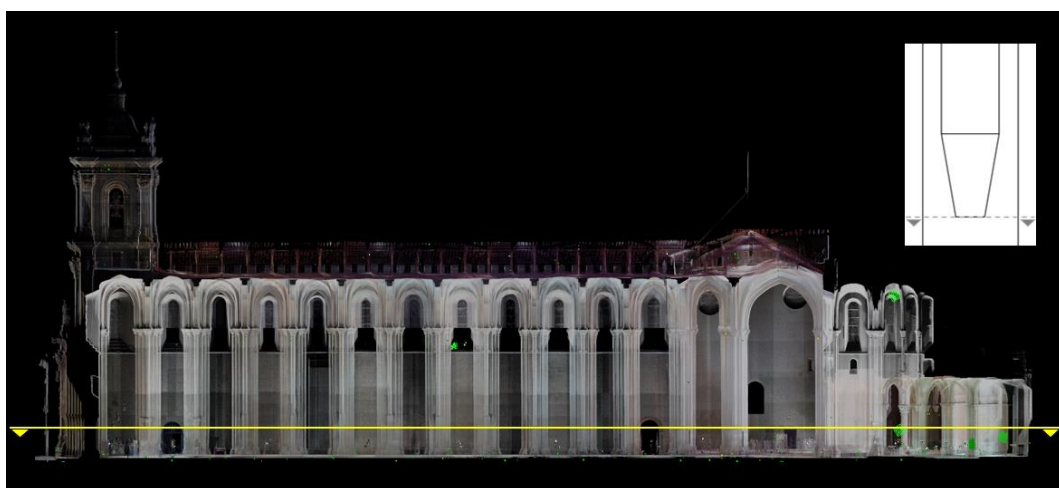


Figura 84 – Demonstração do corte em planta pela base das mísulas piramidais dos pilares da Igreja.
Fonte: Elaboração própria.

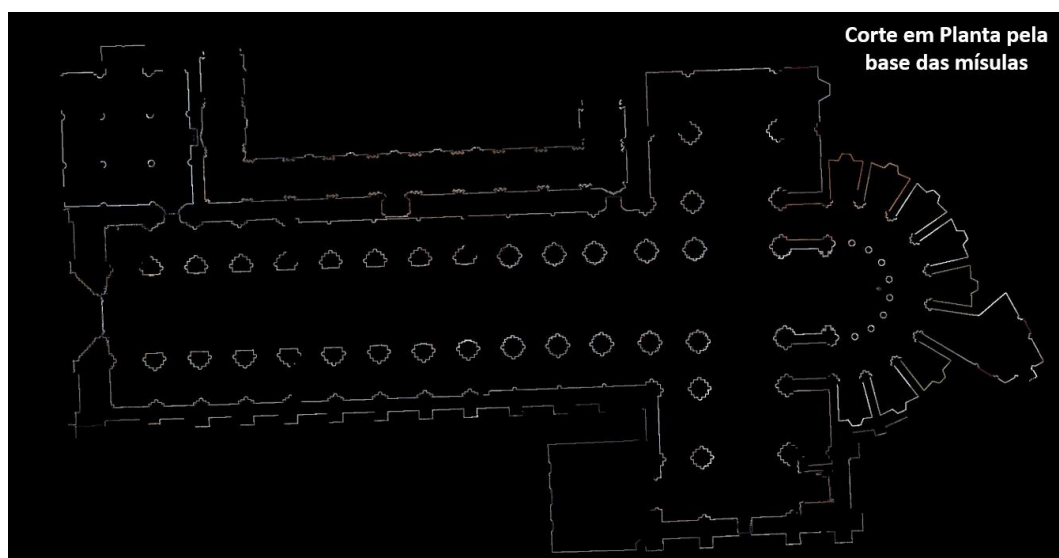


Figura 85 – Corte em planta pela base das mísulas piramidais dos pilares da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

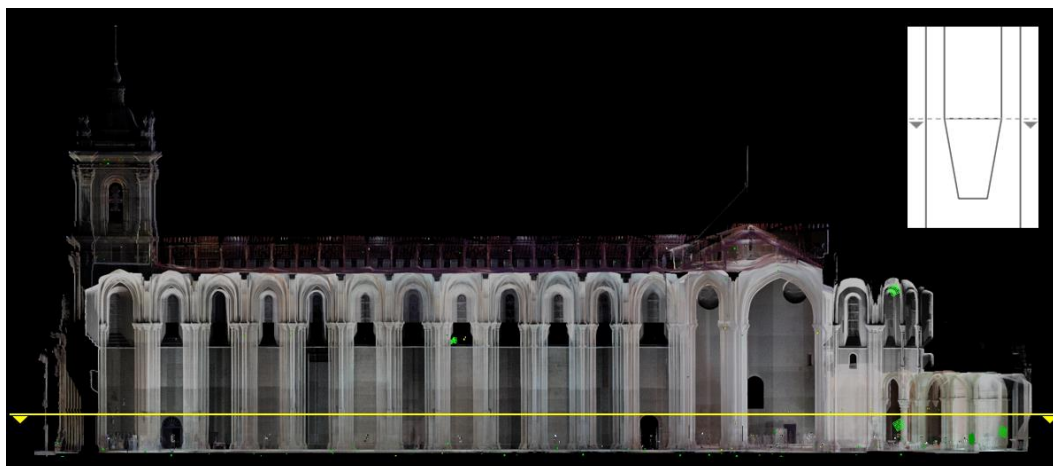


Figura 86 – Demonstração do corte em planta pela altura das mísulas piramidais dos pilares da Igreja.
Fonte: Elaboração própria.

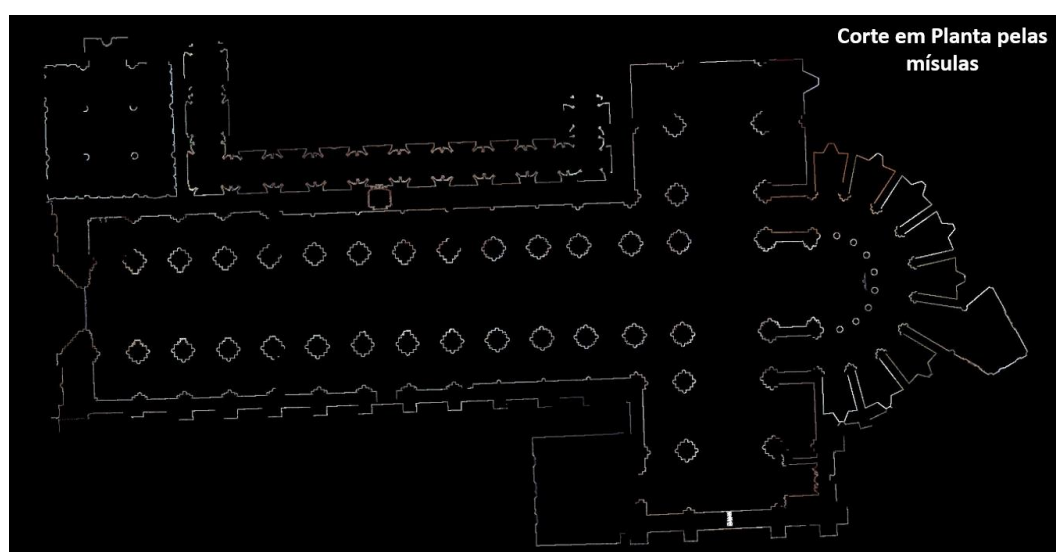


Figura 87 – Corte em planta pela altura das mísulas piramidais dos pilares da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

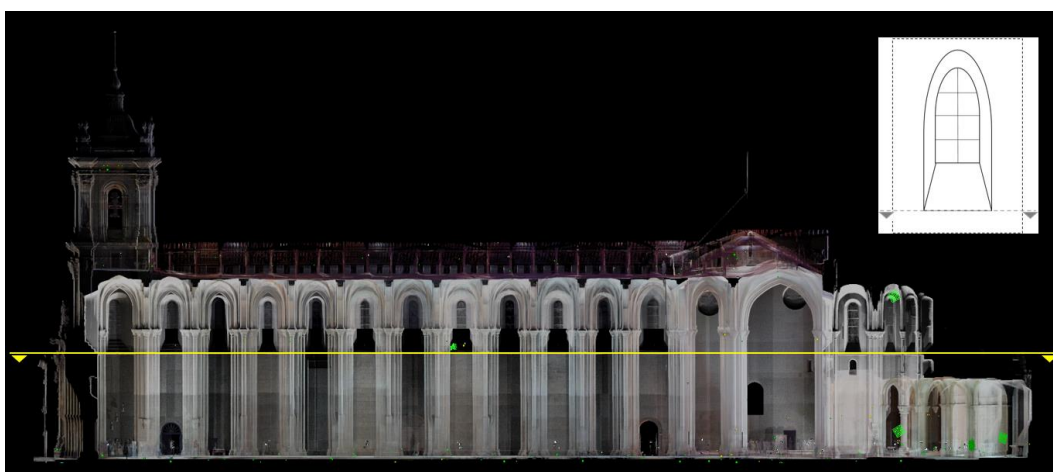


Figura 88 – Demonstração do corte em planta pela base das janelas.
Fonte: Elaboração própria.

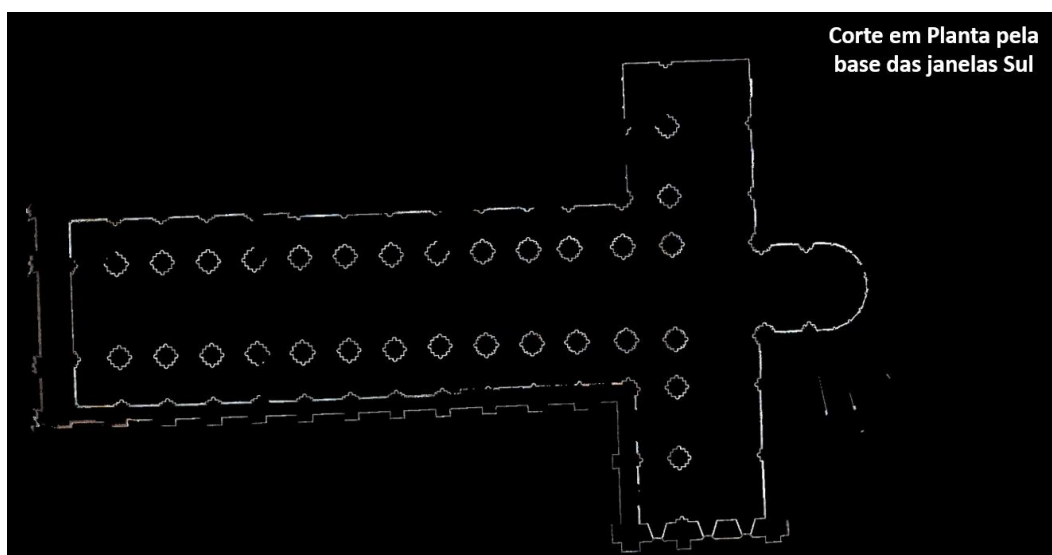


Figura 89 – Corte em planta pela base das janelas Sul da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.



Figura 90 – Demonstração do corte em planta pela base das abóbadas.
Fonte: Elaboração própria.

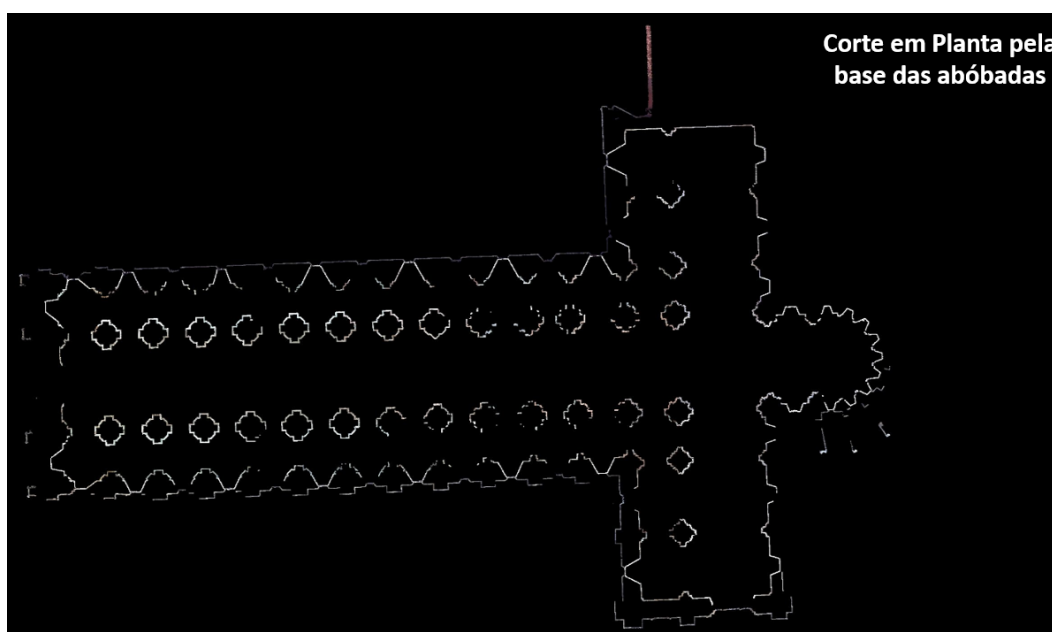


Figura 91 – Corte em planta pela base das abóbadas da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

7.1.2.2 Medições

Através dos diversos cortes efectuados para a Igreja do Mosteiro de Alcobaça procedeu-se à realização de algumas medições que pudessem servir de auxiliar na sua interpretação e análise (Tabela 3).

Tabela 3 – Tipos de medições realizadas por modelo de corte.

MEDIÇÕES	Cortes Longitudinais	Cortes Transversais
Comprimento da Igreja / Transepto	✓	✓
Largura da Igreja		✓
Altura da abóbada	✓	✓
Largura da abóbada		✓
Largura da Nave		✓
Espessura do pilar	✓	✓
Espessura do extradorso		✓

Atendendo às figuras dos cortes longitudinais e transversais nos anexos F e G, é possível verificar-se que a estrutura das abóbadas não é regular. Como tal, esta situação terá influência aquando da medição da altura de cada abóbada, uma vez que a posição escolhida para a concretização dessa medição é comum a todas as abóbadas (isto é, haverá casos em que a posição escolhida indicará o ponto mais elevado da abóbada, e outros casos em que tal não se verificará).

Para os cortes em planta as medições foram realizadas directamente sobre uma orto-imagem correspondente à Figura 85.

Para melhor compreensão e estruturação dos resultados obtidos, as medições referidas encontram-se representadas em esboços alusivos a cada tipo de corte e apresentadas sob a forma de tabela.

❖ Medições em cortes longitudinais da Igreja

Primeiramente apresentar-se-ão os resultados para os cortes longitudinais da Igreja do Mosteiro de Alcobaça. A Figura 92 consiste no esboço para os cortes longitudinais das Naves Norte (L2) e Sul (L4) da Igreja, demonstrando as medições realizadas para as alturas das abóbadas e para o comprimento da Igreja. O esboço para o corte longitudinal da Nave Central da Igreja (L3) apresenta-se na Figura 93. Em ambos os casos não foram consideradas as larguras das abóbadas nem a inclusão do extradorso.

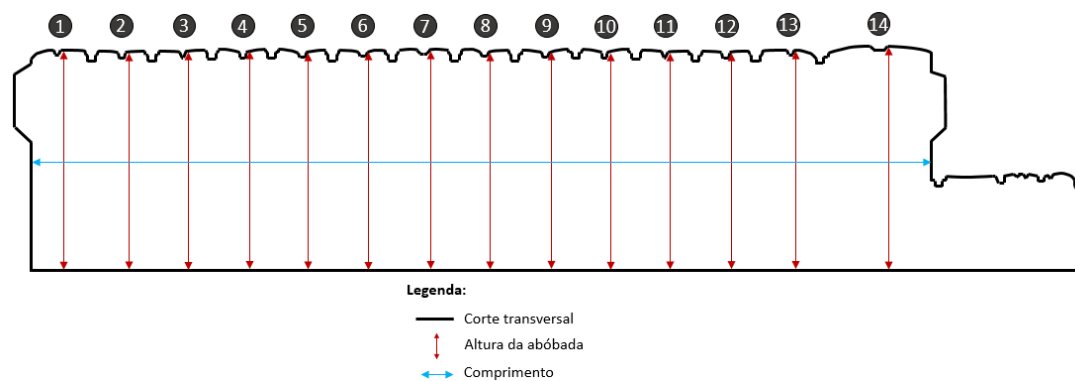


Figura 92 – Esboço de medições realizadas para os cortes L2 e L4 da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.
Fonte: Elaboração própria.

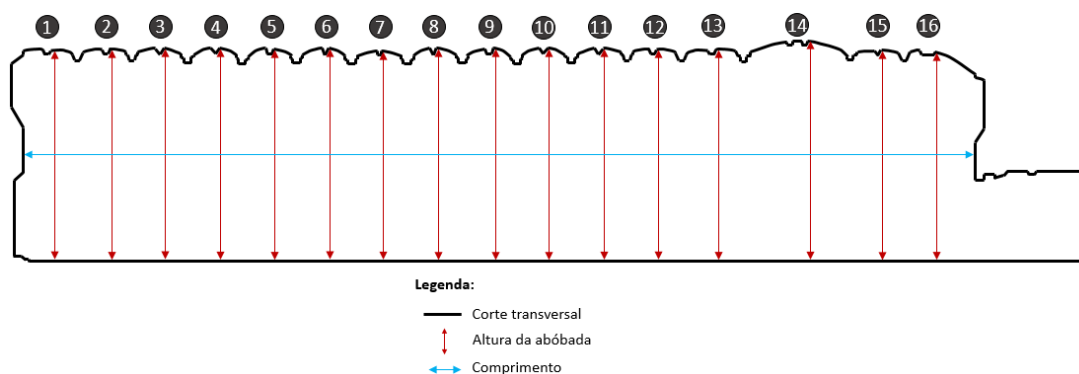


Figura 93 – Esboço de medições realizadas para o corte L3 da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.
Fonte: Elaboração própria.

Apresenta-se, na Tabela 4, as medições correspondentes às representadas na Figura 92 e Figura 93 para os cortes longitudinais da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Tabela 4 – Medições realizadas para os cortes longitudinais da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

	Abóbada	Corte L2	Corte L3	Corte L4	Corte L6	Corte L7	Corte L8	Corte L9
Altura (m)	1	19.12	20.08	19.09	19.26	19.23	19.21	19.21
	2	18.92	20.16	18.86	20.32	20.31	20.17	20.17
	3	18.97	20.15	18.79	-	-	-	-
	4	18.88	20.22	18.77	-	-	-	-
	5	18.93	20.18	18.78	-	-	-	-
	6	19.02	20.21	18.80	-	-	-	-
	7	19.11	19.99	19.14	-	-	-	-
	8	19.09	20.08	18.86	-	-	-	-
	9	19.12	20.03	18.90	-	-	-	-
	10	19.38	19.97	19.19	-	-	-	-
	11	19.23	20.22	18.85	-	-	-	-
	12	18.96	20.11	18.72	-	-	-	-
	13	18.90	20.15	18.76	-	-	-	-
	14	19.41	20.87	19.30	-	-	-	-
	15	-	19.99	-	-	-	-	-
	16	-	19.53	-	-	-	-	-
Comprimento (m)		78.08	92.41	78.12	14.41	14.38	14.33	14.34

Comparando os valores obtidos nos cortes L2, L3 e L4, relativos às Naves da Igreja do Mosteiro de Alcobaça, verifica-se que as alturas das abóbadas possuem uma altura semelhante, variando entre cerca de 19 e 20 metros, pelo que se supõe que o plano de construção da Igreja considerava a elevação das três naves à mesma altura. Verifica-se, ainda, que os valores das alturas das naves laterais, L2 (Norte) e L4 (Sul), apesar de semelhantes, são superiores na Nave Norte, de altura média de 19.07 m com um desvio-padrão de 16 cm, do que na Nave Sul de altura média de 18.92 m com um desvio-padrão de 18 cm, devido ao pavimento desta estar mais elevado (Figura 94).

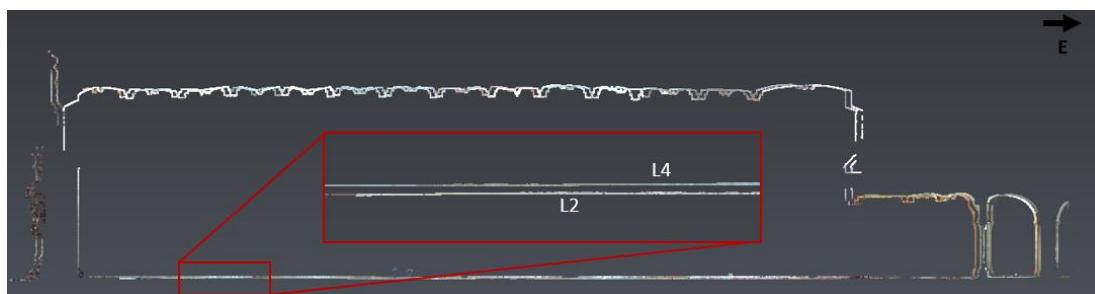


Figura 94 – Desnível existente entre os cortes longitudinais L2 e L4.

O esboço a seguir apresentado na Figura 95 é alusivo aos cortes L10 e L11 realizados no eixo central dos pilares da Igreja do Mosteiro de Alcobaça, para os quais foram medidas alturas das abóbadas, espessura do pilar e comprimento da igreja.

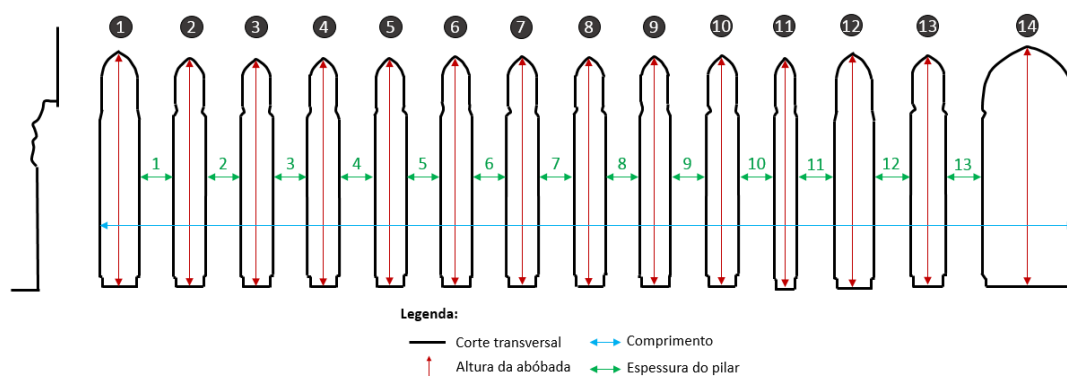


Figura 95 – Esboço de medições realizadas para os cortes L10 e L11 da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.
Fonte: Elaboração própria.

As medidas correspondentes às representadas na Figura 95 para os cortes L10 e L11 encontram-se exibidas na Tabela 5.

Tabela 5 – Medições relativas aos cortes L10 e L11 da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

	Altura (m)		Espessura do pilar (m)		Comprimento (m)	
	Corte L10	Corte L11	Corte L10	Corte L11	Corte L10	Corte L11
1	18.32	18.10	2.71	2.69	76.50	76.57
2	17.88	18.07	2.73	2.71		
3	17.80	18.07	2.72	2.73		
4	17.84	17.76	2.74	2.78		
5	17.89	17.83	2.68	2.82		
6	17.99	17.84	2.76	2.69		

7	18.10	18.08	2.72	2.67		
8	18.01	17.88	2.74	2.69		
9	18.08	17.88	2.85	2.82		
10	18.11	18.16	2.83	2.80		
11	17.88	18.04	2.83	2.80		
12	18.22	18.05	2.85	2.81		
13	18.12	17.94	2.79	2.82		
14	18.82	18.81	-	-		

Com base nas alturas registadas na Tabela 5 para os cortes L10 e L11, e considerando a altura 14 um *outlier* (dada a evidente distinção estrutural), obtém-se uma altura média de 18.02 m para L10, com um desvio-padrão de 0.15 m, e 17.98 m para L11, com um desvio padrão de 0.12 m. Quanto aos pilares verifica-se que existem, em média, pilares com 2.69 m, 2.73 m e 2.82 m de espessura.

❖ Medições em cortes transversais da Igreja

Para o caso dos cortes transversais foram realizados três diferentes esboços, adaptados às diferenças estruturais da Igreja do Mosteiro de Alcobaça e ao local onde o corte é realizado (se no centro das abóbadas ou no centro dos pilares).

As figuras seguidamente apresentadas correspondem a esboços para os cortes transversais T2 e T3 do transepto da Igreja. A Figura 96 representa as medições realizadas para as alturas das abóbadas e espessuras do extradorso, enquanto que a Figura 98 exhibe as larguras das abóbadas e comprimento do transepto da Igreja.

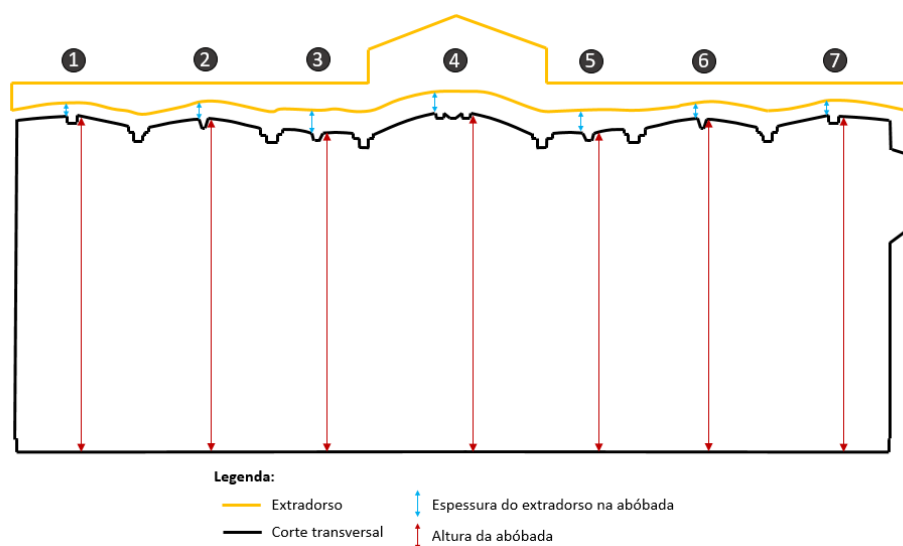


Figura 96 – Esboço de medições (alturas) realizadas para os cortes T2 e T3 da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.
Fonte: Elaboração própria.

As medições respeitantes às alturas das abóbadas e espessuras do extradorso representadas na Figura 96, para os cortes transversais T2 e T3 da Igreja do Mosteiro de Alcobaça, estão indicadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Medições relativas às alturas das abóbadas e espessuras do extradorso para os cortes T2 e T3 da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

		Corte T2	Corte T3	Diferença
Altura (m)	1	20.32	19.25	1.07
	2	20.27	19.27	1.00
	3	19.51	18.93	0.58
	4	20.86	20.10	0.76
	5	19.33	18.78	0.55
	6	20.20	19.20	1.00
	7	20.17	19.12	1.05
Espessura do extradorso (m)	1	0.41	0.40	-
	2	0.57	0.42	
	3	0.75	0.75	
	4	0.44	0.56	
	5	0.90	0.67	
	6	0.57	0.34	
	7	0.41	0.37	

Segundo os valores apresentados, verifica-se que as alturas das abóbadas medidas no corte T2 são consideravelmente superiores às medidas em T3, com uma diferença de altura entre cerca de 0.5 m e 1 m. A espessura do extradorso é variável, atendendo à sua composição de areia (Figura 97).

**Figura 97** – Extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

A Figura 98 e a Tabela 7, a seguir apresentadas, exibem as medições realizadas relativas às larguras das abóbadas e da Igreja do Mosteiro de Alcobaça para os cortes T2 e T3.

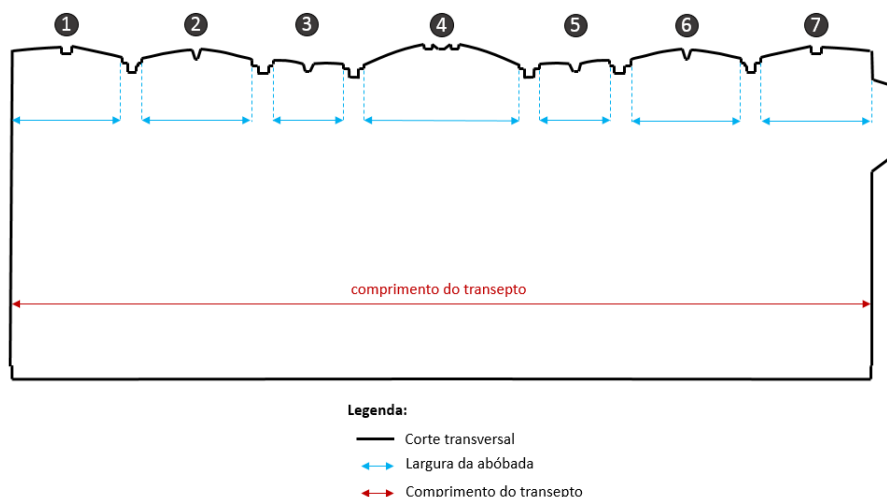


Figura 98 – Esboço de medições (larguras e comprimento) realizadas para os cortes T2 e T3 da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 7 – Medições relativas às larguras das abóbadas e comprimento do transepto da Igreja do Mosteiro de Alcobaça para os cortes T2 e T3.

		Corte T2	Corte T3
Largura (m)	1	6.71	6.64
	2	6.74	6.77
	3	4.26	4.85
	4	9.50	9.97
	5	4.22	4.84
	6	6.85	6.88
	7	6.66	6.74
Comprimento do transepto (m)		52.20	52.27

O comprimento do transepto da Igreja medido é de 52.20 m em T2 e de 52.27 m em T3, valores ligeiramente superiores aos apresentados por Jorge [2017], nomeadamente, 160 pés ou 52 m segundo o valor teórico projectado (quadratura referida no capítulo 3) e 52.07 m de valor medido na igreja.

As figuras abaixo apresentadas correspondem a esboços para os cortes transversais T4 a T15 da Igreja, representando as medições realizadas para as alturas das abóbadas e espessuras do extradorso (Figura 99) e para as larguras das abóbadas e da Igreja (Figura 100).

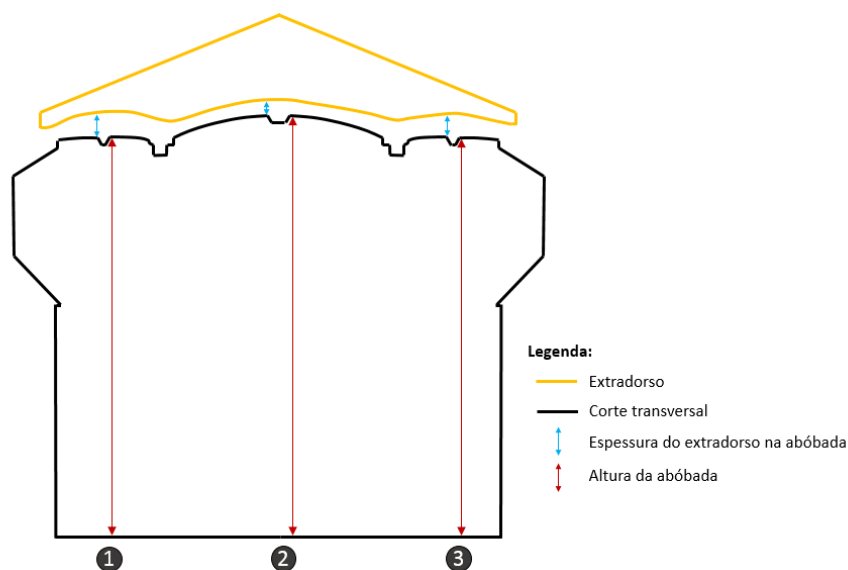


Figura 99 – Esboço de medições (alturas) realizadas para os cortes T4 a T15 da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.
Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 8 exhibe as medições realizadas relativas às alturas das abóbadas e do extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça representadas na Figura 99.

Tabela 8 – Medições relativas às alturas realizadas para os cortes transversais T4 a T15 da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Corte	Altura (m)			Espessura do extradorso (m)		
	1	2	3	1	2	3
T4	18.99	20.04	18.76	0.75	0.54	0.60
T5	19.25	20.18	18.88	0.54	0.48	0.66
T6	19.39	19.88	19.17	0.52	0.57	0.61
T7	19.10	19.98	18.80	0.67	0.49	0.71
T8	19.05	20.07	18.85	0.67	0.67	0.66
T9	19.10	19.97	19.08	0.69	0.58	0.65
T10	18.97	20.21	18.79	0.67	0.51	0.74
T11	18.88	20.17	18.69	0.79	0.58	0.72
T12	18.81	20.18	18.72	0.82	0.66	0.80
T13	18.86	20.13	18.76	0.68	0.55	0.70
T14	18.88	20.13	18.85	0.60	0.69	0.67
T15	19.13	20.09	19.06	-	0.65	0.77

É possível constatar, uma vez mais, através dos valores registados na tabela acima, que as alturas das abóbadas correspondentes à Nave Central da Igreja – abóbada 2 (altura média de 20.09 m) – são superiores às das Naves laterais e, ainda, que a Nave Norte – abóbada 1 (altura média de 19.03 m) – preserva valores ligeiramente superiores à Nave Sul – abóbada 3 (altura média de 18.87 m).

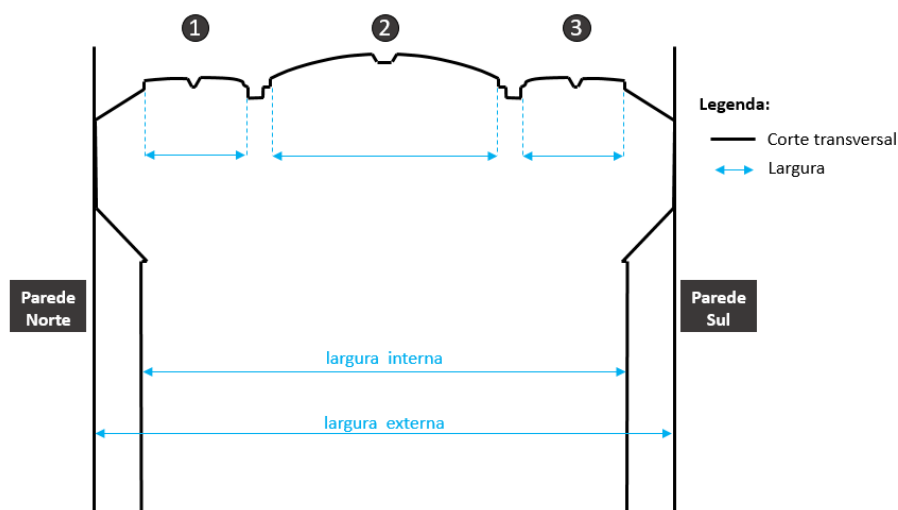


Figura 100 – Esboço de medições (larguras) realizadas para os cortes T4 a T15 da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 9 exhibe as medições realizadas relativas às larguras das abóbadas da Igreja do Mosteiro de Alcobaça, indicadas na Figura 100 para os cortes transversais T4 a T15. Os valores assinalados com * e ** correspondem a medições realizadas para a largura da igreja a alturas diferentes às indicadas no esboço (zona superior e zona central, respectivamente), devido a inexistência de pontos.

Tabela 9 – Medições relativas às larguras realizadas para os cortes transversais T4 a T15 da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Corte	Largura das abóbadas (m)			Largura da Igreja (m)	
	1	2	3	Interior	Exterior
T4	4.48	9.92	4.57	20.38	-
T5	4.29	9.34	4.38	20.39	-
T6	4.29	9.40	4.38	20.43	25.05
T7	4.52	9.36	5.24	20.44	25.08
T8	4.53	9.43	5.30	20.91	25.09
T9	4.58	9.55	5.19	20.83	24.37*
T10	4.42	9.71	5.32	20.85	25.06
T11	4.91	9.67	5.30	20.90	25.02
T12	4.98	9.60	5.30	21.37	24.99
T13	4.96	9.60	5.37	21.31	24.95
T14	4.88	9.58	5.36	21.29	25.12**
T15	4.93	9.59	5.17	21.21	24.99

Através dos valores apresentados na Tabela 9, é possível verificar que a largura do corpo da Igreja vai diminuindo no sentido O-E, havendo uma diferença de 0.83 m entre os cortes T15 e T4. Segundo Jorge [2017] o valor médio da largura da Igreja no seu interior é de 64 pés (equivalente a 20.80 m) segundo a intenção arquitectónica (valor teórico projectado) e de 20.76 m de valor medido na igreja (realidade arquitectónica). Contudo, segundo os valores registados na tabela, através da aplicação do TLS, obteve-se o valor médio de 20.86 m de largura.

Apresentam-se, por fim, os esboços respeitantes aos cortes realizados no eixo central dos pilares da Igreja do Mosteiro de Alcobaça, nomeadamente, T6c, T11c e T13c.

Na Figura 101 encontram-se representadas as alturas das três naves e espessuras do extradorso da igreja.

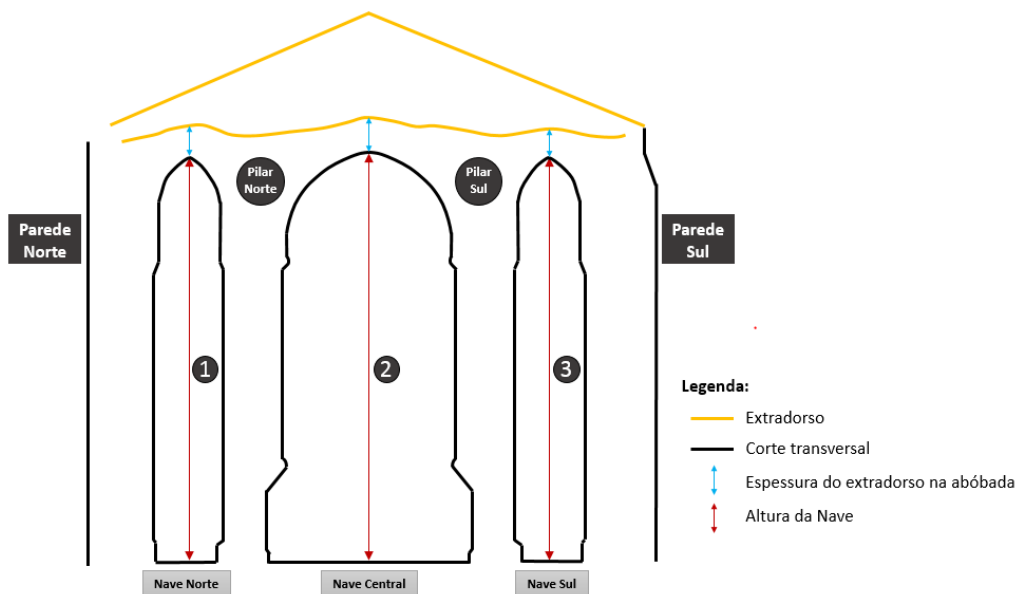


Figura 101 – Esboço de medições (alturas) realizadas para os cortes T6c, T11c e T13c da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 102 apresenta as larguras das três naves da igreja (medidas em diferentes posições), a largura da Igreja (no interior e considerando as paredes exteriores) e a espessura dos pilares.

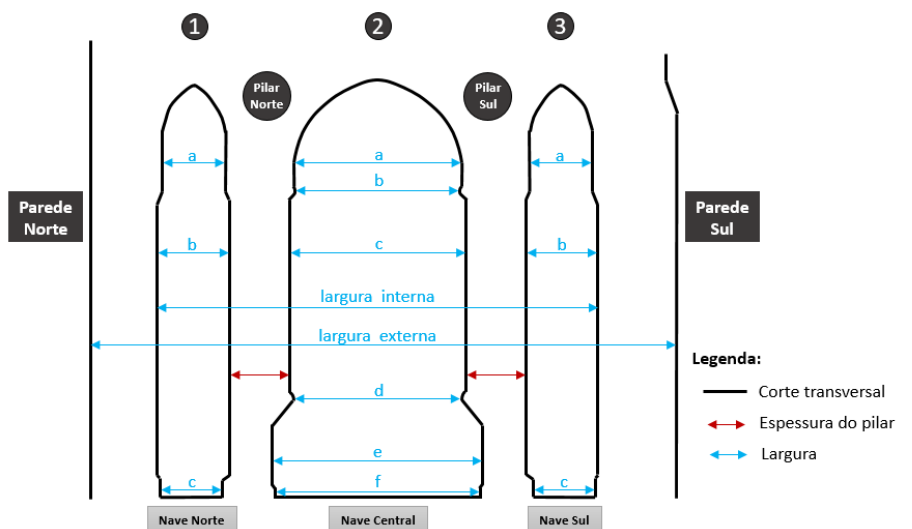


Figura 102 – Esboço de medições (larguras) realizadas para os cortes T6c, T11c e T13c da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 10, a seguir apresentada, indica todas as medições representadas na Figura 101 e Figura 102 para os cortes T6c, T11c e T13c. O valor assinalado com * corresponde a uma medição realizada numa posição diferente (zona superior do corte) à comum, devido a inexistência de pontos.

Tabela 10 – Medições obtidas para os cortes transversais T6c, T11c e T13c da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

		T6c	T11c	T13c
Altura (m)	1	18.29	18.39	18.20
	2	18.74	18.74	19.16
	3	18.14	18.38	18.01
Espessura do extradorso (m)	1	1.47	1.23	1.34
	2	1.25	-	1.23
	3	1.53	1.20	1.31
Largura da Nave Norte (1) (m)	a	2.61	2.77	2.77
	b	3.13	3.08	3.05
	c	2.38	2.70	2.46
Largura da Nave Central (2) (m)	a	7.53	7.65	7.82
	b	7.25	7.38	7.42
	c	7.81	7.84	7.89
	d	-	7.56	7.62
	e	8.40	9.21	9.19
	f	8.00	9.10	9.04
Largura da Nave Sul (3) (m)	a	2.93	3.16	3.29
	b	3.31	3.38	3.46
	c	2.84	2.91	2.96
Espessura do Pilar (m)	Norte	2.78	2.77	2.70
	Sul	2.77	2.77	2.69
Largura da Igreja (m)	Interna	19.86	19.73	19.75
	Externa	26.11	26.01	25.71*

Analisando os valores indicados na tabela verifica-se, uma vez mais, a tendência das alturas das abóbadas para as diferentes naves, isto é, a Nave Central mais elevada que as Naves laterais e a Nave Norte com valores superiores à Nave Sul, possivelmente devido ao desnível do pavimento.

Quanto ao extradorso, comparando com os valores apresentados nas Tabela 6 e Tabela 8, verifica-se que a sua espessura é maior no centro dos pilares (T6c, T11c e T13c) do que no centro das abóbadas (T2 a T15).

A espessura dos pilares em cada corte é idêntica entre si.

Relativamente à largura da igreja, comparando com os valores apresentados na Tabela 9, verifica-se uma diminuição da medida da largura interna e um aumento na medida da largura externa, devido à presença dos contrafortes na linha dos pilares da Igreja.

Para as medições realizadas foi estimado o erro máximo a elas associado, considerando a precisão do levantamento com base na distância, a precisão do registo das nuvens de pontos e o erro sistemático do instrumento indicado pela FARO [2013]. A distância máxima das nuvens de pontos considerada a partir do *Laser Scanner* foi de 12.5 m.

A precisão de um ponto 3D, por técnicas topográficas, pode ser expressa na forma,

$$\sigma_{3D} = \pm(a + b \cdot D) \quad (5)$$

onde a é a constante aditiva (erro sistemático) em milímetros, b o factor de escala em partes por milhão (precisão do *Laser Scanner* em ppm) e D a distância medida em quilómetros [Calvão, 2010].

Sabendo que o erro sistemático é de 2 mm, a precisão do *Laser Scanner* utilizado é de 1 mm por 25 m, correspondente a 40 ppm, e que a distância máxima considerada é de 12.5×10^{-3} Km, segundo a expressão (5), resulta $\sigma_{3D} = \pm 2.5 \text{ mm}$.

A distância entre dois pontos no espaço (x_1, y_1, z_1) e (x_2, y_2, z_2) , é dada por:

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (6)$$

D pode ser representada como uma função de diversas variáveis:

$$D = f(x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2) \quad (7)$$

A incerteza em D é dada pela fórmula de propagação de incertezas [Mendes, 2011],

$$\sigma_D^2 = \left(\frac{\partial D}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial y_1}\right)^2 \sigma_{y_1}^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial y_2}\right)^2 \sigma_{y_2}^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial z_1}\right)^2 \sigma_{z_1}^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial z_2}\right)^2 \sigma_{z_2}^2 \quad (8)$$

onde σ_D^2 é a variância de D , $\left(\frac{\partial D}{\partial x_1}, \frac{\partial D}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial D}{\partial z_2}\right)$ as derivadas parciais de D em ordem às variáveis (x_1, x_2, \dots, z_2) e $(\sigma_{x_1}^2, \sigma_{x_2}^2, \dots, \sigma_{z_2}^2)$ as variâncias das variáveis (x_1, x_2, \dots, z_2) .

Assumindo que as componentes x , y e z têm a mesma incerteza obtém-se:

$$\sigma_{x_1}^2 = \sigma_{x_2}^2 = \sigma_{y_1}^2 = \sigma_{y_2}^2 = \sigma_{z_1}^2 = \sigma_{z_2}^2 = \sigma_{3D}^2 = 2.5^2 \text{ mm} = 6.25 \text{ mm} \quad (9)$$

Aplicando as expressões (8) e (9) resulta:

$$\sigma_D^2 = 2 \cdot \sigma_{3D}^2 \quad (10)$$

A incerteza da distância (σ_D) entre 2 pontos da mesma nuvem é cerca de 3.54 mm.

Para o caso da distância ser entre 2 pontos de nuvens diferentes é necessário considerar as incertezas da distância, de registo das nuvens de pontos e a associada a cada ponto.

Primeiramente é necessário determinar a incerteza associada a 1 ponto de uma nuvem (σ_P) afectada pela incertezas de registo (σ_R) e pela incerteza do ponto 3D anteriormente calculada:

$$\sigma_P^2 = \sigma_{3D}^2 + \sigma_R^2 \quad (11)$$

onde $\sigma_{3D}^2 = 6.25 \text{ mm}$ e $\sigma_R = 6 \text{ mm}$ (incerteza máxima de registo no projecto em questão). Para σ_P obtém-se 6.5 mm.

Para se conhecer a incerteza da distância entre 2 pontos de nuvens diferentes é necessário aplicar as expressões (8) e (11) resultando,

$$\sigma_D^2 = 2 \cdot \sigma_P^2 \quad (12)$$

e, portanto $\sigma_D = 9.19 \text{ mm}$.

Considera-se que as medições realizadas detêm um erro máximo de 9.2 mm.

7.1.2.3 Orto-imagens (Projecções ortogonais)

As orto-imagens, como referido na página 43, foram geradas a partir de seccionamentos nas nuvens de pontos 3D e constituem um produto final 2D (*pixel* de 2.5 e 5 mm), a partir do qual é possível obter informação qualitativa e quantitativa de forma rápida e precisa.

Para o caso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça as orto-imagens obtidas correspondem a cortes (Figura 103) e fachadas exteriores (Figura 104 e Figura 105) identificados na Figura 74 e Figura 79.



Figura 103 – Projeção ortogonal vertical da cabeceira da Igreja do Mosteiro de Alcobaça vista no sentido Oeste-Este (T1).



Figura 104 – Projeção ortogonal da fachada exterior Norte da Igreja do Mosteiro de Alcobaça (L1) vista no sentido Este-Oeste.

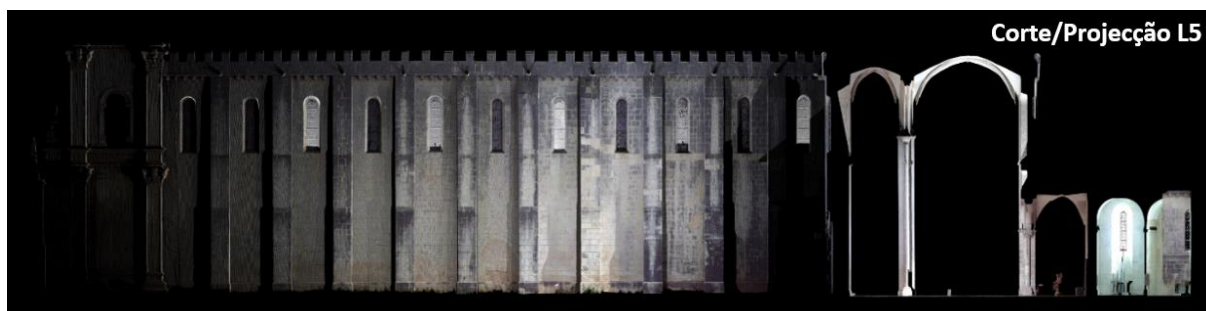


Figura 105 – Projeção ortogonal da fachada exterior Sul da Igreja do Mosteiro de Alcobaça (L5) vista no sentido Oeste-Este.

Como mencionado, é possível realizar medições sobre a orto-imagem. Como tal, e a título de exemplo, optou-se por uma orto-imagem com um *pixel* de 5 mm de um corte em planta (correspondente à Figura 85) e procedeu-se à realização de diversas medições, através do *software Autocad Civil 3D* [Autodesk, 2018], que pudessem ter relevância para análise (Figura 106 e Figura 107). A referida orto-imagem foi importada para o *software* tendo em atenção as devidas coordenadas (X,Y,Z) e factor de escala. Este método tem a vantagem de ser possível medir quaisquer distâncias e não apenas entre pontos que existam na nuvem de pontos.

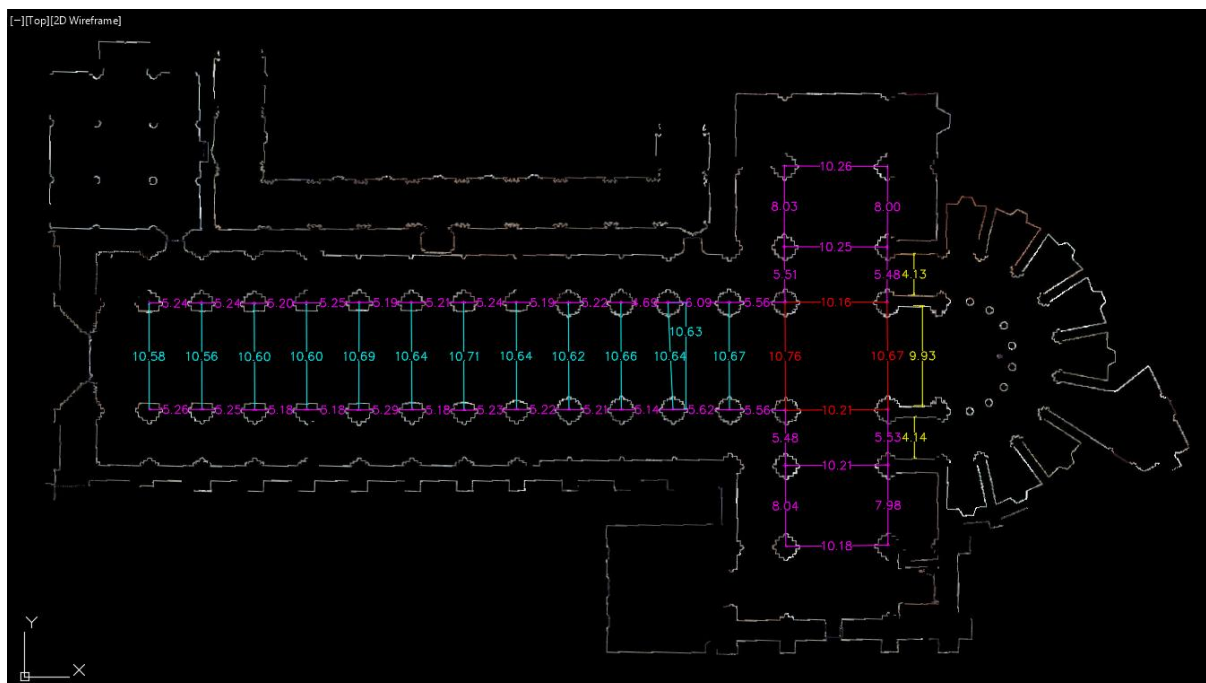


Figura 106 – Medições realizadas sobre a orto-imagem do corte em planta (pela base das mísulas) da Igreja do Mosteiro de Alcobaça (1).

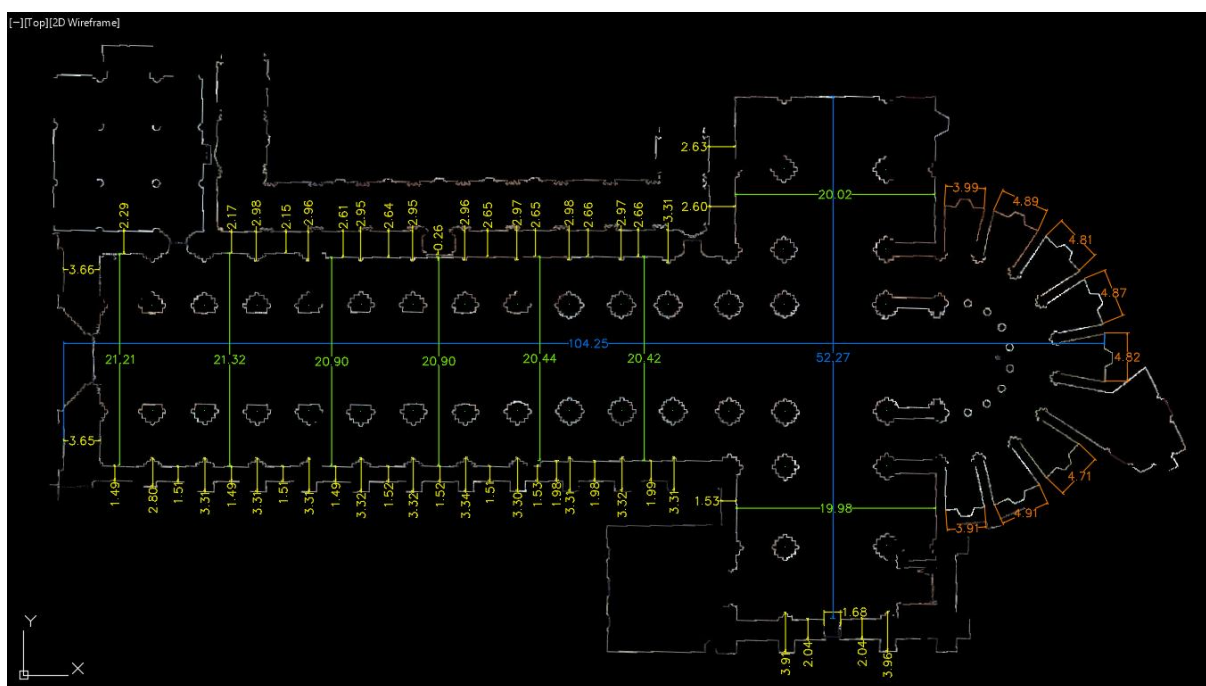


Figura 107 – Medições realizadas sobre a orto-imagem do corte em planta (pela base das mísulas) da Igreja do Mosteiro de Alcobaça (2).

A Figura 106 e Figura 107 encontram-se exibidas em tamanho maior no Anexo H.

Sendo a orto-imagem um produto *raster*, não é possível detectar no *software Autocad* vértices, arestas, pontos médios ou intersecções que assistam as medições. Neste sentido as medições foram realizadas tendo em conta a percepção do utilizador e as ferramentas possíveis e disponíveis do *software* (*polyline* e *zoom*).

As figuras seguintes exemplificam a situação acima descrita, com foco na determinação do centro dos pilares (recorrendo a *polylines* cruzadas e posicionando-as no centro das extremidades de cada pilar – Figura 108) bem como no local escolhido para a realização das medições (centro da espessura da linha – Figura 109).

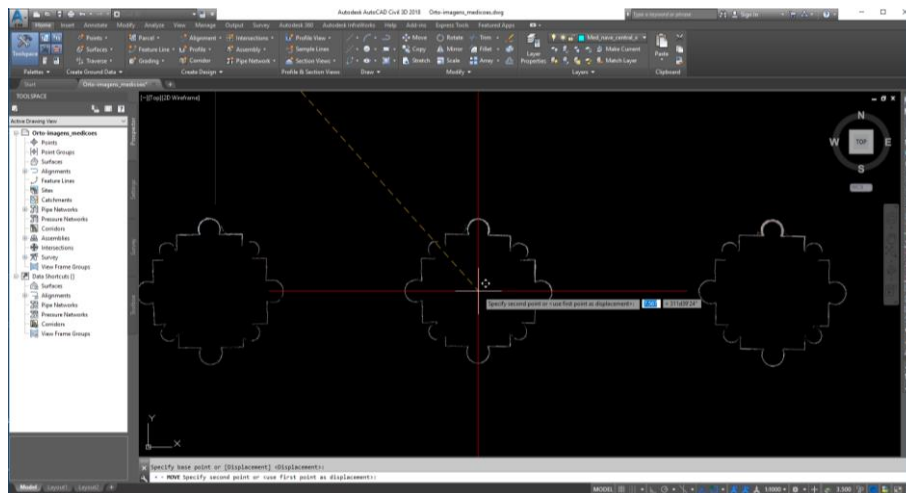


Figura 108 – Determinação do centro dos pilares com vista à obtenção das medições axiais.

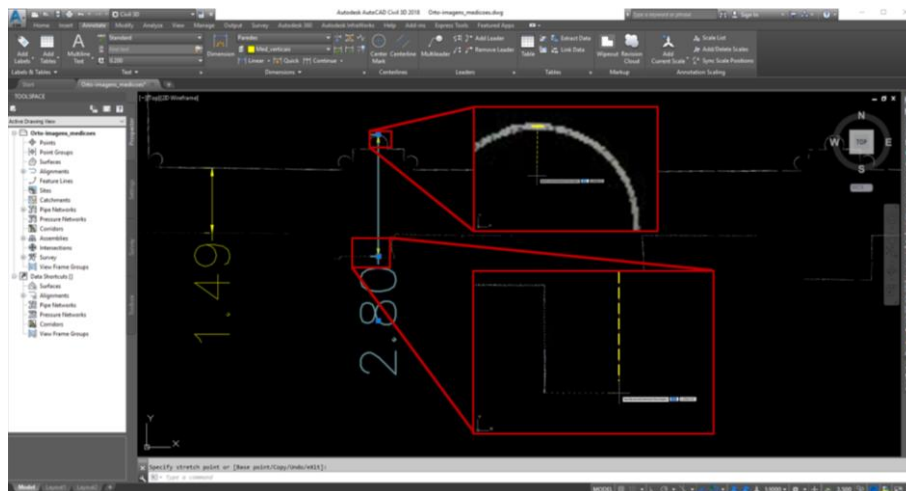


Figura 109 – Local seleccionado para a realização das medições.

Analisando a Figura 106 é possível verificar que a figura quadrada do cruzeiro (a vermelho), que segundo Jorge [2017] serviu de matriz proporcional ao traçado modular da quadratura (ver capítulo 3, página 15) e mede 32 pés reais (ou 10.40 m) de lado, não é efectivamente quadrada e que as medições axiais realizadas são diferentes de 10.40 m, havendo uma diferença de -24 e -19 cm no sentido E-O (eixo do X) e de +36 e +27 cm no sentido N-S (eixo do Y). Segundo a Figura 107 é possível constatar-se as seguintes situações acerca da espessura das paredes da Igreja (a amarelo):

- Parede Norte do corpo da Igreja:
 - Não tendo em consideração os contrafortes, a parede encontra-se dividida em duas espessuras distintas, com uma diferença média de 49 cm (espessuras médias de 2.16 m e 2.65 m, no sentido E-O);
 - Na zona dos contrafortes a parede exibe uma espessura média de 2.97 m (considerou-se a medição do último contraforte (3.31 m), no sentido E-O, um *outlier*).
- Parede Sul do corpo da Igreja:
 - A zona inicial da parede (zona Oeste) é a menos espessa;
 - Não considerando os contrafortes, a parede encontra-se dividida, de forma evidente, em duas espessuras distintas, com uma diferença média de 47 cm (espessuras médias de 1.51 m e 1.98 m, no sentido E-O), confirmando a presença de diferentes fases de construção. Esta situação é, ainda, marcada pela dissimelhança coincidente dos pilares do corpo da Igreja, sublinhando a questão da existência da primitiva Igreja de Alcobaça (zona Oeste);
 - Na zona dos contrafortes a parede tem uma espessura média de 3.32 m (considerando a medição do primeiro contraforte (2.80 m) no sentido E-O um *outlier*).

Através das restantes medições realizadas para a Igreja do Mosteiro de Alcobaça pretende-se estabelecer uma comparação com algumas medidas avançadas por Jorge [2017].

Tabela 11 – Comparação entre medidas obtidas na orto-imagem e medidas avançadas por Jorge [2017].

	Medida teórica [Jorge, 2017]		Medida efectuada [Jorge, 2017]	Medida realizada na orto-imagem
Distância média axial entre pilares	16 pés	5.20 m	5.20 m	5.30 m
Largura média da Nave Central	33 pés	10.72 m	10.71 m	10.63 m
Comprimento da igreja	320 pés	104.00 m	104.12 m	104.25 m
Largura da igreja (centro)	64 pés	20.80 m	20.76 m	20.90 m
Comprimento do transepto	160 pés	52.00 m	52.07 m	52.27 m
Porta dos mortos	5 ^{3/12} pés	1.70 m	1.70 m	1.68 m

É necessário compreender, antes de mais, que o local escolhido para a realização da medição afecta o seu valor, e atender possivelmente às diferentes fases de construção da Igreja, aos respectivos métodos construtivos e às irregularidades inerentes aos materiais que a compõem.

A distância média axial entre pilares e a largura média da Nave Central da Igreja medidas na orto-imagem e indicadas na Tabela 11 consideram as distâncias axiais entre os 24 pilares (no sentido E-O) do corpo da igreja (ver Figura 79 – pilares 1 a 12).

7.1.3 *Sacristia Nova e Capela Relicário*

Para a Sacristia Nova e Capela Relicário foram obtidos produtos que atentassem os objectivos enunciados e as exigências da Direcção do Mosteiro de Alcobaça e da DGPC, nomeadamente, cortes longitudinais e transversais e modelos 3D.

7.1.3.1 Cortes

Para a Sacristia Nova e Capela Relicário do Mosteiro de Alcobaça foram realizados, à semelhança do Claustro de D. Dinis e da Igreja, cortes directamente na nuvem de pontos, com vista à obtenção de resultados com a maior precisão possível para a extracção de informação numérica e visual, nomeadamente, cortes longitudinais e transversais (Figura 110). Para cada corte foi, adicionalmente, obtida uma orto-imagem.

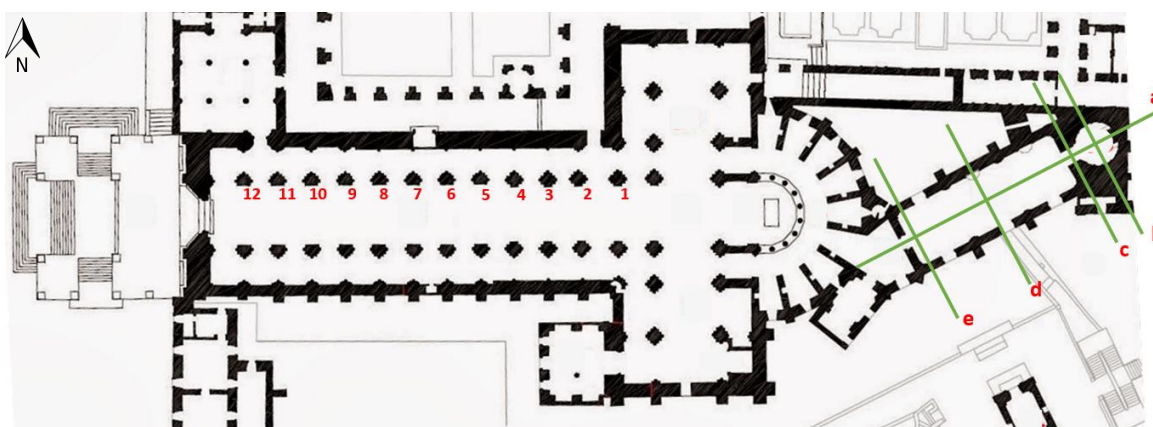


Figura 110 – Identificação dos cortes realizados para a Sacristia Nova e Capela Relicário do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: Elaboração própria.

Fonte da planta: <https://arquitecturaycristianismo.files.wordpress.com/2016/08/15.jpg>.

A Figura 111 e Figura 112, seguidamente apresentadas, exibem os cortes acima identificados (Anexo I).

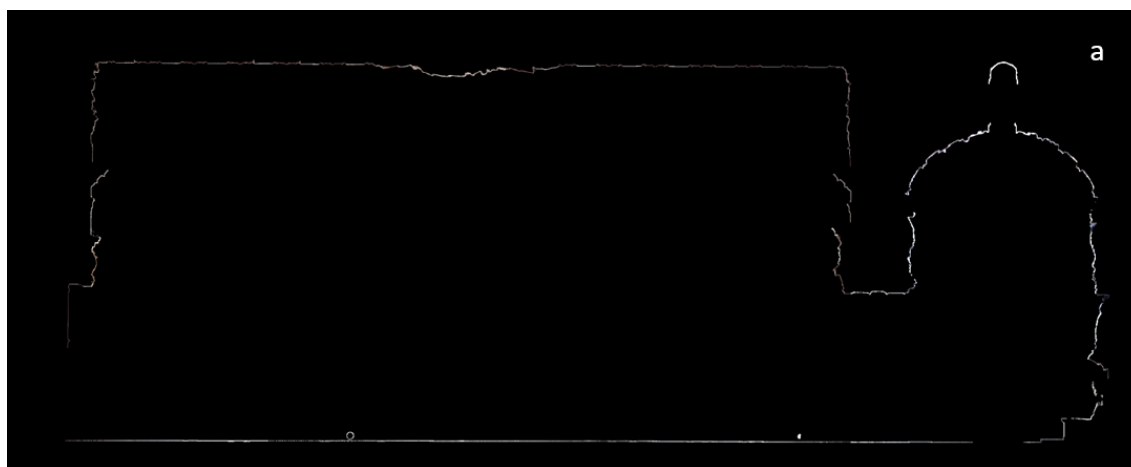


Figura 111 – Corte longitudinal (a) obtido para a Sacristia Nova e Capela Relicário do Mosteiro de Alcobaça.

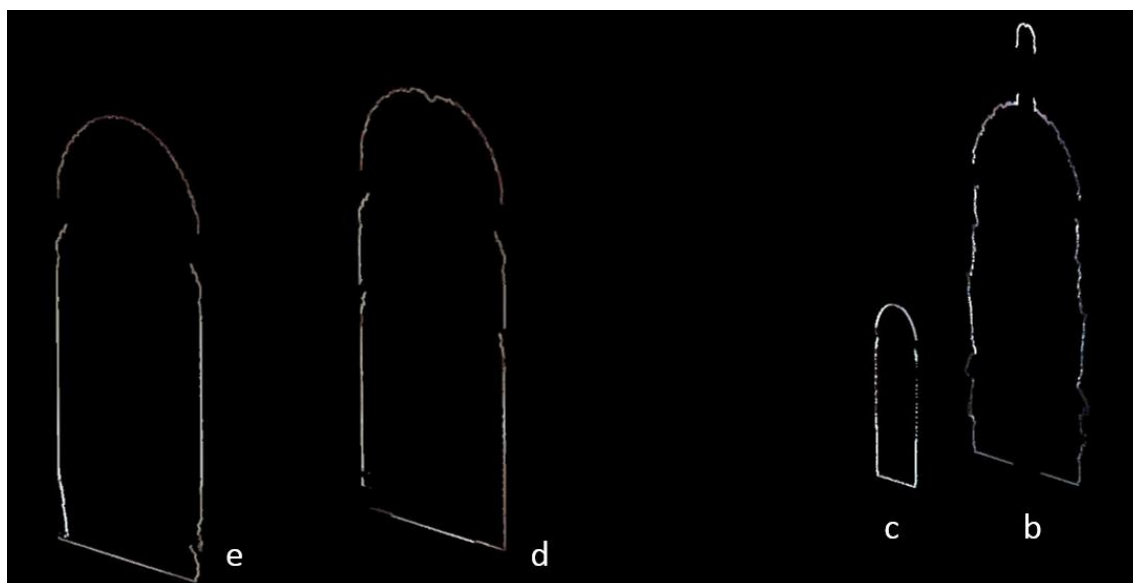


Figura 112 – Esquema de localização dos cortes transversais obtidos para a Sacristia Nova e Capela Relicário do Mosteiro de Alcobaça.

7.1.3.2 Modelos 3D

Os modelos 3D gerados neste projecto, a partir de nuvens de pontos providas da tecnologia TLS, correspondem aos modelos da Sacristia Nova e da Capela Relicário.

O modelo da Sacristia Nova (Figura 113) foi gerado a partir da nuvem de pontos obtida para o levantamento da Igreja do Mosteiro de Alcobaça e, como referido previamente, a nuvem de pontos relativa a esta dependência foi apenas obtida com o propósito de se conseguir realizar a ligação entre as nuvens de pontos da Igreja (registo), sem recorrer à georreferenciação, pelo que o número de estacionamentos, ou *scans*, é muito reduzido (2 *scans*). Como tal, não só o detalhe inerente ao modelo é igualmente reduzido, como se obtêm diversas zonas com buracos devido à ausência de pontos na nuvem. Para se obter um modelo 3D mais completo e detalhado desta edificação do Mosteiro de Alcobaça, seria necessário realizar um levantamento com maior resolução, maior número de estacionamentos do *Laser Scanner* e uma combinação com a fotogrametria (para se obter uma textura foto-realista).

O modelo 3D da Capela Relicário foi gerado a partir das nuvens de pontos do projecto independente realizado e apresenta-se na Figura 114. Verifica-se que existem zonas no modelo com menor qualidade, devido à ausência de pontos na nuvem (zonas de sombra). Esta situação pode ser colmatada por realização de *scans*/estacionamentos adicionais, efectuados a uma altura superior. De um modo geral, para se obter um modelo 3D de maior qualidade da Capela Relicário seria necessário realizar uma cobertura fotográfica, combinando as técnicas TLS e fotogrametria.



Figura 113 – Modelo 3D da Sacristia Nova gerado a partir da nuvem de pontos do levantamento da Igreja: A) Modelo 3D; B) Tecto do modelo 3D; C) Pavimento do modelo 3D; D) Lado esquerdo do modelo 3D em (A); Lado direito do modelo 3D em (A).



Figura 114 – Modelo 3D da Capela Relicário gerado a partir da nuvem de pontos (projecto independente).

7.1.3.3 Unroll - Planificação da Capela Relicário

A Figura 115 corresponde à planificação da nuvem de pontos da Capela Relicário (com forma tubular) criada através de um eixo central, permitindo uma visualização completa desta dependência num plano.



Figura 115 – Planificação da nuvem de pontos da Capela Relicário.

7.2 Fotogrametria – Restituição Múltipla Automática

7.2.1 *Modelos 3D dos Túmulos*

Após as fases de triangulação/calibração, produção da nuvem de pontos e geração da superfície com textura, é obtido o modelo 3D com grande detalhe para cada túmulo e exportado em formato *.obj*. A Figura 116 exhibe os modelos 3D dos túmulos de D. Pedro I e D. Inês de Castro, os quais podem ser vistos sob diferentes perspectivas no Anexo J.

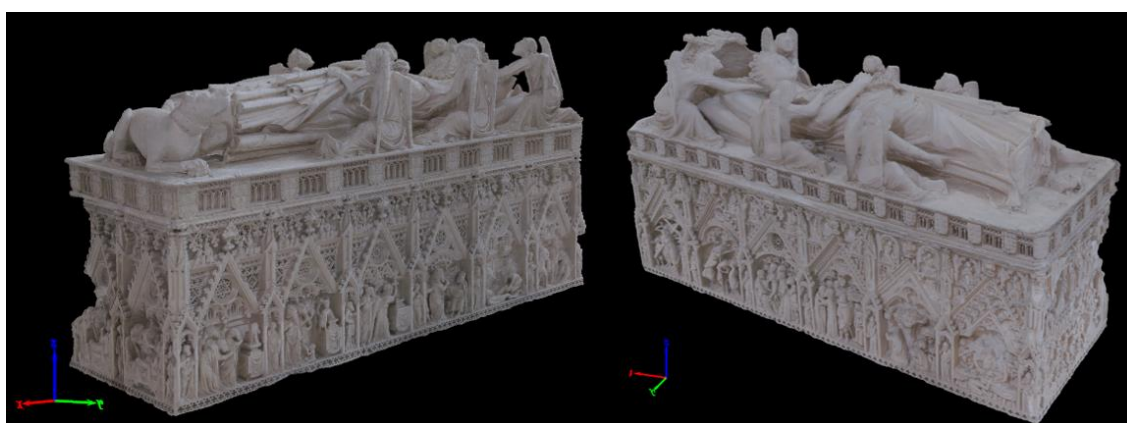


Figura 116 – Modelos 3D dos túmulos de D. Pedro I (esquerda) e de D. Inês de Castro (direita).

Recorrendo a uma análise visual do Modelo 3D do túmulo de D. Pedro I é possível verificar-se grande qualidade face ao pormenor intrínseco desta arca tumular medieval de escultura tumular gótica (Figura 117).



Figura 117 – Pormenor do modelo 3D do túmulo de D. Pedro I.

Também o túmulo de D. Inês de Castro ostenta uma qualidade evidente face ao detalhe inerente a esta obra-prima da escultura tumular gótica (Figura 118).

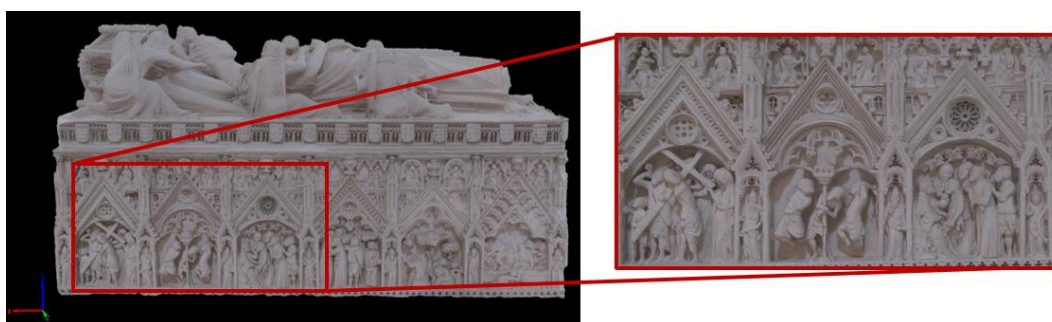


Figura 118 – Pormenor do modelo 3D do túmulo de D. Inês de Castro.

7.2.2 Ortomosaicos dos Túmulos

Após os modelos 3D construídos obtiveram-se ortomosaicos das quatro faces laterais de cada túmulo com uma resolução de 0.25 mm/pixel (Figura 119 e Figura 120).



Figura 119 – Ortomosaicos das quatro faces laterais do túmulo de D. Pedro I.



Figura 120 – Ortomosaicos das quatro faces laterais do túmulo de D. Inês de Castro.

A partir dos ortomosaicos obtidos é possível verificar que os túmulos não são coerentes nas suas dimensões. No caso do Túmulo de D. Pedro I verificou-se, por exemplo, uma diferença de altura de 3 cm na orto-imagem do canto superior esquerdo (115 / 118 cm) na Figura 119. O desfoque que pode ser verificado na textura de alguns ortomosaicos dos modelos corresponde, essencialmente, a zonas de menor luminosidade aquando da aquisição das fotografias digitais.

7.2.3 Holograma do Túmulo de D. Inês de Castro

Desenvolveu-se ainda, a título exemplar, um holograma para o modelo do túmulo de D. Inês de Castro que permite demonstrar, sob formato vídeo, o modelo 3D gerado ao público visitante do Mosteiro, através de um *smartphone* (Figura 121) ou ecrã LCD (Figura 122).



Figura 121 – Holograma do túmulo de D. Inês de Castro a partir de um *smartphone*.
Fonte: Elaboração própria.

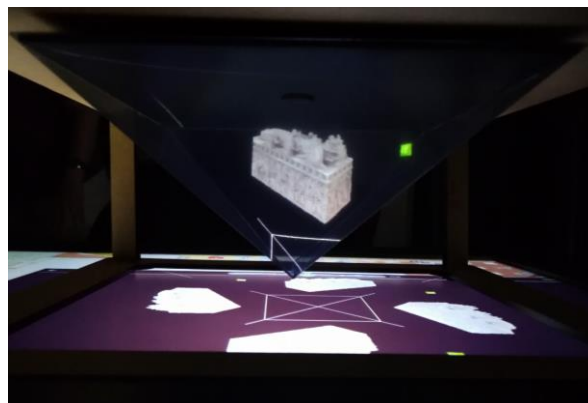


Figura 122 – Holograma do túmulo de D. Inês de Castro a partir de um ecrã LCD.
Fonte: Elaboração própria.

8. DIFICULDADES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste subcapítulo enumeram-se, seguidamente, as principais dificuldades sentidas no decorrer no presente projecto:

- Limpeza das nuvens muito morosa;
- Tempo de processamento muito elevado devido à imensa quantidade de dados;
- Computador utilizado não está suficientemente optimizado para processar dados de um projecto desta envergadura, apesar de ser o equipamento disponível com melhor desempenho.

Como perspectivas futuras pretende-se modelar tridimensionalmente a Igreja do Mosteiro de Alcobaça a fim de poder constituir mais um elemento para a análise da evolução da construção e métodos construtivos do monumento e, ainda, servir de base à realização de visitas virtuais numa visualização 3D. A realização de um estudo específico das abóbadas da Igreja constitui, também, um futuro elemento de análise a considerar.

Por último, relativamente aos túmulos de D. Pedro I e D. Inês de Castro, pretende-se efectuar a modelação e inclusão das estátuas que lhes servem de suporte.

9. CONCLUSÃO

O levantamento realizado a partir da tecnologia TLS e das técnicas fotogramétricas de restituição múltipla automática permitiram gerar produtos específicos para documentar a evolução da arquitectura e detectar diferenças nos métodos construtivos ao longo das diversas fases de construção do Mosteiro de Alcobaça.

A nuvem de pontos do Mosteiro foi gerada a partir do TLS, com elevada precisão, possibilitando a realização de seccionamentos e medições na própria nuvem com incertezas inferiores a 1 cm, orto-imagens de elevada qualidade (*pixel* de 2.5 e 5 mm) e produção de modelos 3D com textura real. Segundo as medições realizadas neste projecto, com especial foco no cruzeiro da Igreja (distâncias entre pilares a diferentes alturas), não se pode concluir que haja deformações estruturais. A partir dos diferentes produtos gerados verificou-se que, no geral, as abóbadas do Claustro de D. Dinis e da Igreja não se encontram alinhadas nem a sua estrutura é regular. A tecnologia TLS permitiu, ainda, reconhecer a existência de diferentes fases de construção, com clara evidência no Claustro de D. Dinis através da geração de um nDSM.

Os modelos 3D dos túmulos, obtidos por fotografias digitais e pela aplicação da técnica de restituição múltipla automática, representam com elevado detalhe os objectos reais. Os orto-mosaicos gerados para os túmulos, a partir das fotografias e nuvens de pontos respectivas, permitem uma avaliação métrica dos mesmos.

Ambos os levantamentos permitem copiar a realidade para a secretária dos investigadores, permitindo-lhes chegar a conclusões que de outro modo não estariam facilmente ao seu alcance. Tratando-se de um projecto de grande dimensão, tendo em conta o elevado volume de dados, existiram, no entanto, algumas dificuldades no processamento dos dados e geração dos resultados em tempo útil. Ainda assim, a aplicação das técnicas apresentadas demonstraram ser uma solução importante no estudo pretendido. Toda a documentação final obtida permitirá um melhor conhecimento do monumento e constituirá um precioso auxiliar ao nível de intervenções de conservação e restauro.

REFERÊNCIAS

- Albertz, J. (2001). "Albrecht Meydenbauer – Pioneer of Photogrammetric Documentation of the Cultural Heritage." *Proceedings of the 18th International Symposium CIPA*, Potsdam, Germany, 18-21 September, pp. 19-25.
- Andrés, A.N., F.B. Pozuelo, J.R. Marimón and A.M. Gisbert (2012) "Generation of virtual models of cultural heritage." *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 13, No. 1, pp. 103-106.
- Andrés, M.A.N. and F.B. Pozuelo (2009) "Evolution of the architectural and heritage representation." *Journal of Landscape and Urban Planning*, Vol. 91, No. 2, pp. 105-112.
- Antunes, J.F.D. (2013) *Mosteiro de Santa Maria de Alcobaça – Análise das intervenções efectuadas nos últimos 50 anos, diagnóstico das anomalias actuais e proposta de intervenção futura*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Armesto-González, J., B. Riveiro-Rodríguez, D. González-Aguilera and M.T. Rivas-Brea (2010) "Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings." *Journal of Archaeological Science*, Vol. 37, No. 12, pp. 3037-3047
- Autodesk, <https://www.autodesk.com/products/civil-3d/overview>, consultado a 14 de Setembro de 2018.
- Barrile, V., A. Nunnari and R.C. Ponterio (2016) "Laser Scanner for the Architectural and Cultural Heritage and Applications for the Dissemination of the 3D Model." *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 223, pp. 555-560.
- Bitelli, G., M. Dellapasqua, V.A. Girelli, S. Sbaraglia and M.A. Tini (2017) "Historical photogrammetry and terrestrial laser scanning for the 3D virtual reconstruction of destroyed structures: A case study in Italy." *Proceedings of the International Conference on Geomatics & Restoration – Conservation of Cultural Heritage in the Digital Era*, Florence, Italy, 22-24 May, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-5/W1, pp. 113-119.
- Calvão, J. (2010) *Apontamentos da Disciplina de Topografia*. Texto não publicado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Castellazzi, G., A.M. D'Altri, S. de Miranda and F. Ubertini (2017) "An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings." *Journal of Engineering Structures*, Vol. 132, pp. 229-248.
- Cocheril, M. (1989) *Alcobaça. Abadia Cisterciense de Portugal*. Imprensa Nacional Casa da Moeda.
- Coelho, L. e J.N. Brito (2007) *Fotogrametria digital*. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

- Crespo, C., J. Armesto, D. González-Aguilera and P. Arias (2010) "Damage Detection on Historical Buildings Using Unsupervised Classification Techniques.", *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Close Range Image Measurement Techniques'*, Eds. J.P. Mills, D.M. Barber, D.M. Miller, P.E. and I. Newton, Newcastle upon Tyne, United Kingdom, 21-24 June, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, No. 5, WG V/3, pp. 184-188.
- Ebrahim, M.A-B. (2015) "3D Laser Scanners' Techniques Overview." *International Journal of Science and Research*, Vol. 4, pp. 323-331.
- FARO (2013) *FARO Laser Scanner Focus3D X 330 – User Manual*. FARO Technologies Inc.
- Herráez, J., P. Navarro, J.L. Denia, M.T. Martín and J. Rodríguez (2014) "Modeling the thickness of vaults in the church of santa maria de magdalena (Valencia, Spain) with laser scanning techniques." *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 15, No. 6, pp. 679-686.
- Jorge, V.F. (2017) *RATIO FECIT DIVERSUM - Ensaios sobre a Abadia de Alcobaça*. Nº 2, Estudos Monásticos Alcobacenses, Direcção-Geral do Património Cultural, Mosteiro de Alcobaça, Portugal.
- Jost, T. and H. Hügli (2002) "Fast ICP algorithms for shape registration." *Pattern Recognition: 24th DAGM Symposium*, Zurich, Switzerland, 16-18 September, Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 91-99.
- Kazhdan, M., M. Bolitho, H. Hoppe (2006). "Poisson Surface Reconstruction." *Proceedings of the fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing*, Cagliari, Sardinia, Italy, 26-28 June, ACM International Conference Proceeding Series, Eurographics Association, pp. 61-70.
- Kraus, K. (2007) *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans*. 2nd Edition, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin, Germany.
- Kuçak, R.A., F. Kiliç, A. Kisa (2016). "Analysis of terrestrial laser scanning and photogrammetry data for documentation of historical artifacts." *Proceedings of the 3rd International GeoAdvances Workshop*, Istanbul, Turkey, 16-17 October, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-2/W1, pp. 155-158.
- Kwoczyńska, B., U. Litwin, I. Piech, P. Obirek and J. Śledź (2016) "The Use of Terrestrial Laser Scanning in Surveying Historic Buildings." *Proceedings of the Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)*, Gdansk University of Technology, Poland, 2-4 June, IEEE, pp. 263-268.
- Leonov, A.V., M.N. Anikushkin, A.V. Ivanov, S.V. Ovcharov, A.E. Bobkov and Y.M. Baturin (2015) "Laser scanning and 3D modeling of the Shukhov hyperboloid tower in Moscow" *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 16, No. 4, pp. 551-559.

- Lerma, J.L., S. Navarro, M. Cabrelles and V. Villaverde (2010) "Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study." *Journal of Archaeological Science*, Vol. 37, No. 3, pp. 499-507.
- Leroux, G. (2012) "INUNDAÇÕES EM ALCOBAÇA NO SÉCULO XVIII (I) A "Grande cheia de 1772" nunca aconteceu." *O Alcoa*, Alcobaça.
- Lo, S.H. (2015) "3D Delaunay triangulation of 1 billion points on a PC." *Elsevier Journal, Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 102-103, pp. 65-73.
- Luhmann, T., S. Robson, S. Kyle and J. Boehm (2014) *Close-range photogrammetry and 3D imaging*. 2nd Edition, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin, Germany.
- Marambio A. y P.G. Almirall (2006) "Escaner Laser: Modelo 3D y orto imágenes arquitectónicas de la Iglesia de Santa Maria del Mar en Barcelona", *ACE: Arquitectura, Ciudad y Entorno*, Centre de Política del Sòl i Valoracions, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, Nº 2, pp. 178-187.
- MathWorks, <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>, consultado a 29 de Janeiro de 2019.
- Mendes, V. B. (2011) *Apontamentos da Disciplina de Instrumentação e Metrologia*. Texto não publicado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Mendonça, V.M. (2017) *Reconstrução 3D biomédica: fotogrametria versus varrimento por laser*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Monnier, G., comunicação pessoal realizada a 17 de Setembro de 2018.
- Mosteiro de Alcobaça, <http://www.mosteiroalcobaca.gov.pt/pt/>, consultado a 8 de Agosto de 2018.
- Pinterest, <https://www.pinterest.pt/pin/514677063646707877>, consultado a 23 de Agosto de 2018.
- Pix4D, <https://pix4d.com/>, consultado a 14 de Maio de 2018
- PORDATA, <https://www.pordata.pt/DB/Municipios>, consultado a 3 de Setembro de 2018
- Pritchard, D., J. Sperner, S. Hoepner and R. Tenschert (2017) "Terrestrial laser scanning for heritage conservation: The Cologne Cathedral documentation project." *Proceedings of the ISPRS Annals 26th International CIPA Symposium*, Eds. J. Hayes, C. Ouimet, M.S. Quintero, S. Fai and L. Smith, Ottawa, Canada, August 28-September 1, International Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. IV-2/W2, pp. 213-220.

- Procházková, J. and D. Martišek (2018) "Notes on Iterative Closest Point Algorithm." *Proceedings of 17th Conference on Applied Mathematics*, Faculty of Mechanical Engineering, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovak, pp. 876-884.
- Quagliarini, E., P. Clini and M. Ripanti (2017) "Fast, low cost and safe methodology for the assessment of the state of conservation of historical buildings from 3D laser scanning: The case study of Santa Maria in Portonovo (Italy)." *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 24, pp. 175-183.
- Redweik, P. (2013) *Apontamentos de Fotogrametria Terrestre*. Texto não publicado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Redweik, P. (2015) *Apontamentos de Fotogrametria Analítica*. Texto não publicado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Redweik, P. (2018) *Apontamentos de Métodos Ópticos de Modelação 3D*. Texto não publicado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- SONY, <https://www.sony.pt/electronics/support/a-mount-body-dslr-a200-series/dslr-a230/specifications>, consultado a 3 de de Setembro de 2018
- Technodigit, <https://www.3dreshaper.com/en/>, consultado a 23 de Julho de 2018.
- Teixeira, J.N. (2002). "Mosteiro de Alcobaça. Recuperação e conservação de coberturas." *Caderno Conjuntos Monásticos / Intervenções – Estudos/Património*, Nº 2, pp. 71.
- Theodor, J.M. and R.S. Furr (2009) "High Dynamic Range Imaging as Applied to Paleontological Specimen Photography." *Palaeontologia Electronica*, Vol. 12, No. 1, pp.1-30.
- Van Genechten, B. (2008) *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications*. Valencia, Spain.
- Xiao, Y., Q. Zhan and Q. Pang (2007) "3D Data Acquisition by Terrestrial Laser Scanning for Protection of Historical Buildings." *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Shanghai, China, 21-25 September, IEEE, pp. 5971-5974.

ANEXOS

ANEXO A – Orto-imagens do exterior do Claustro de D. Dinis



Figura 123 – Projecção ortogonal do exterior do claustro Norte de D. Dinis.



Figura 124 – Projecção ortogonal do exterior do claustro Oeste de D. Dinis.

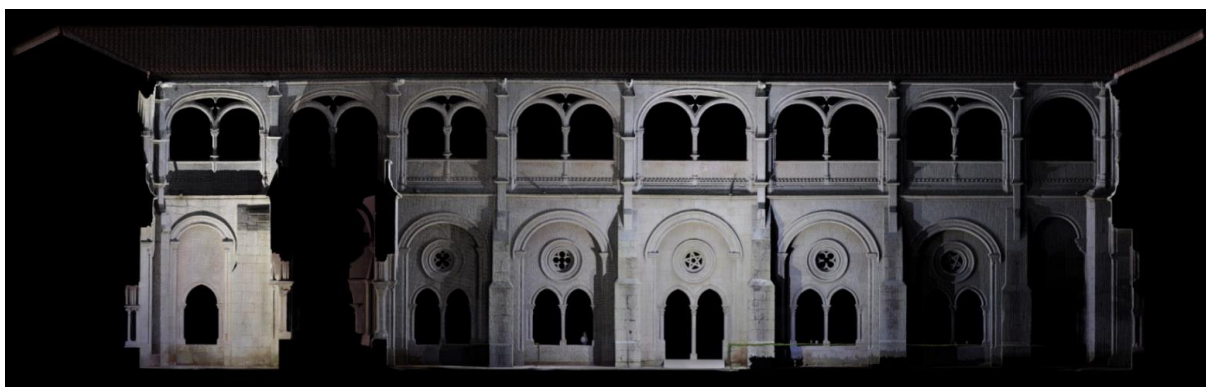


Figura 125 – Projecção ortogonal do exterior do claustro Sul de D. Dinis.



Figura 126 – Projecção ortogonal do exterior do claustro Este de D. Dinis

ANEXO B – Orto-imagens do interior do Claustro de D. Dinis



Figura 127 – Projecção ortogonal do interior do claustro Norte de D. Dinis.



Figura 128 – Projecção ortogonal do interior do claustro Oeste de D. Dinis.



Figura 129 – Projecção ortogonal do interior do claustro Sul de D. Dinis.

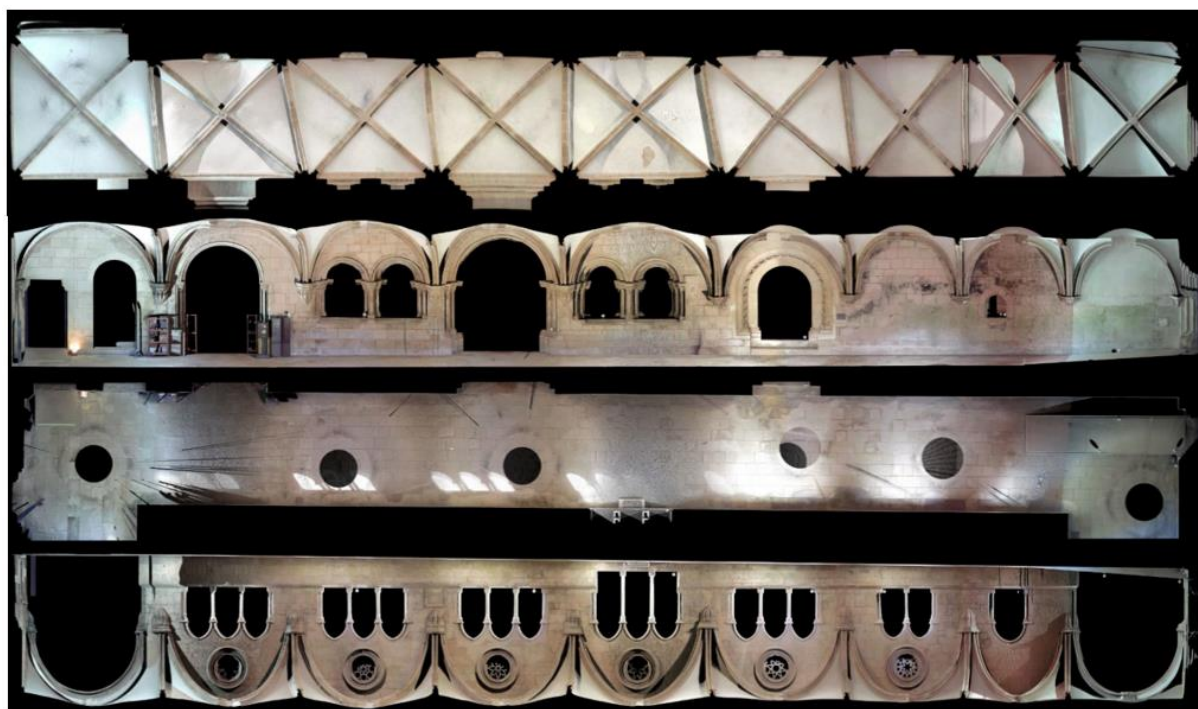


Figura 130 – Projecção ortogonal do interior do claustro Este de D. Dinis.

ANEXO C – Cortes longitudinais para o Claustro de D. Dinis

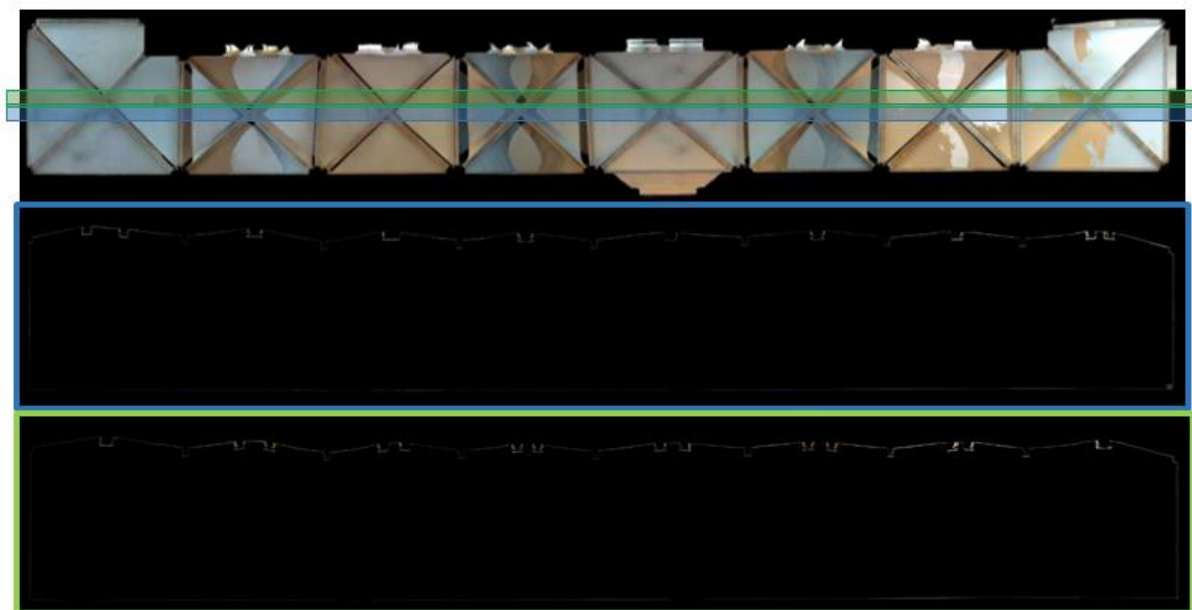


Figura 131 – Cortes longitudinais entre a primeira e última abóbadas (verde) e entre a segunda e penúltima abóbadas (azul) do claustro Norte de D. Dinis.

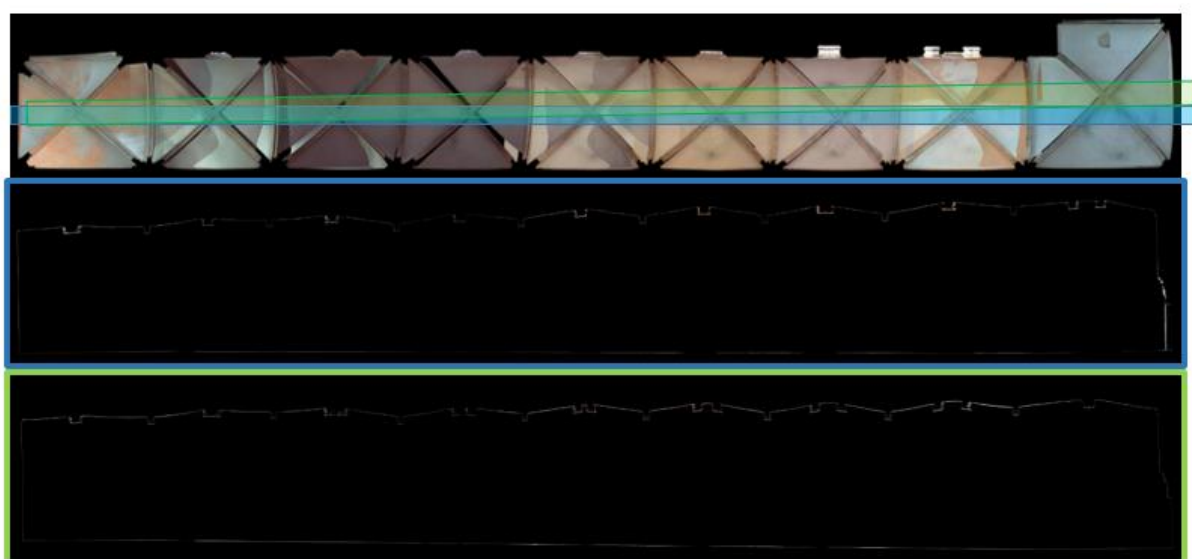


Figura 132 – Cortes longitudinais entre a primeira e última abóbadas (verde) e entre a segunda e penúltima abóbadas (azul) do claustro Oeste de D. Dinis.

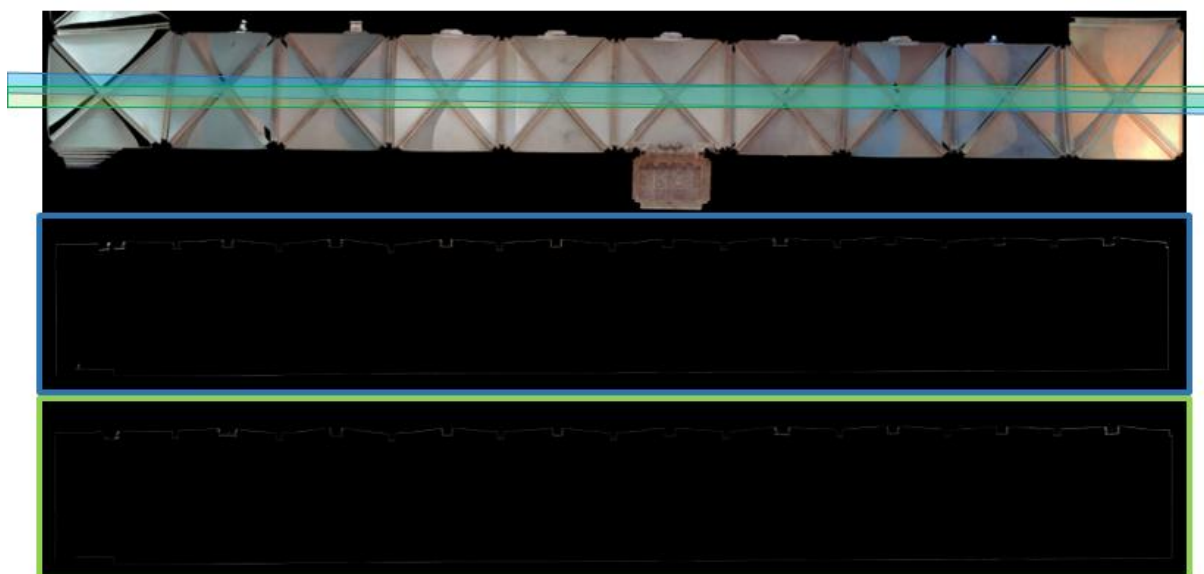


Figura 133 – Cortes longitudinais entre a primeira e última abóbadas (verde) e entre a segunda e penúltima abóbadas (azul) do claustro Sul de D. Dinis.

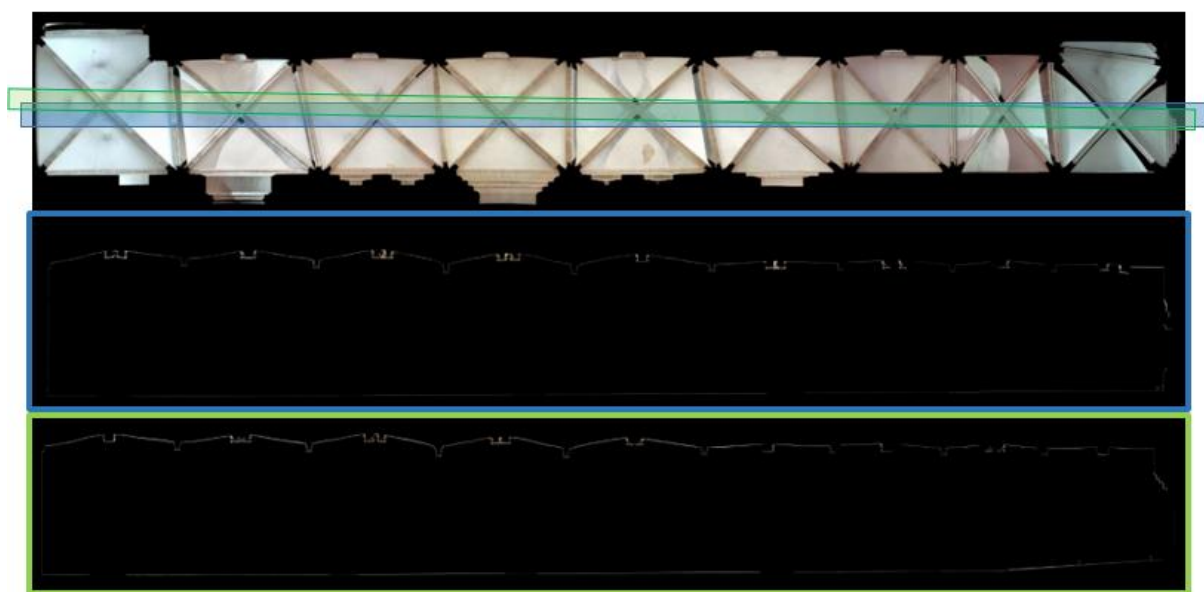


Figura 134 – Cortes longitudinais entre a primeira e última abóbadas (verde) e entre a segunda e penúltima abóbadas (azul) do claustro Este de D. Dinis.

ANEXO D – Cortes transversais para o Claustro de D. Dinis

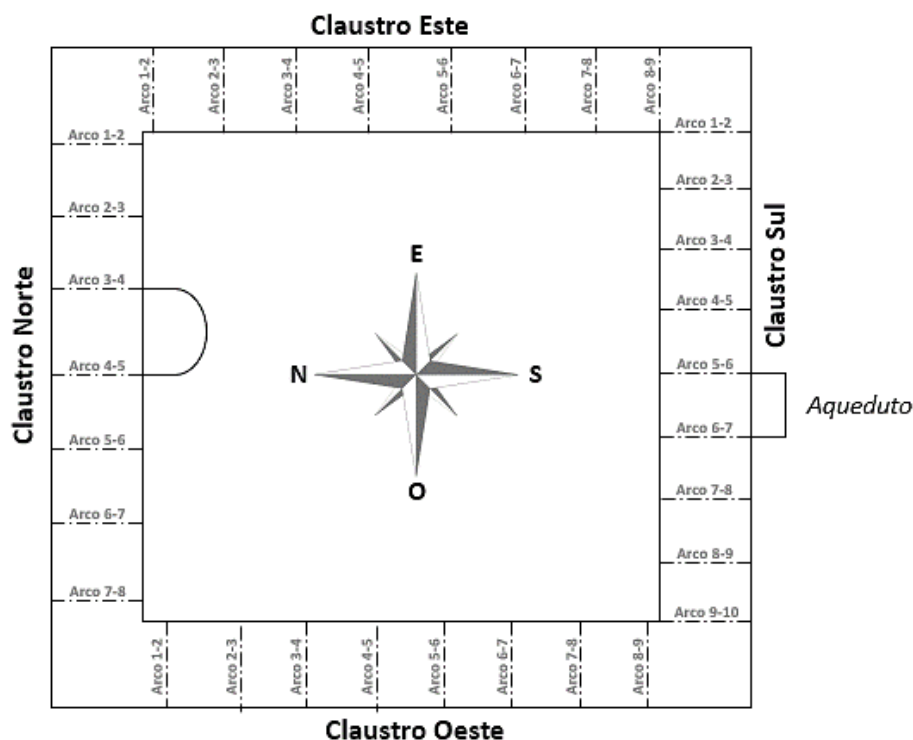


Figura 135 – Identificação dos cortes realizados ao longo de cada arco entre tramo.
Fonte: Elaboração própria.

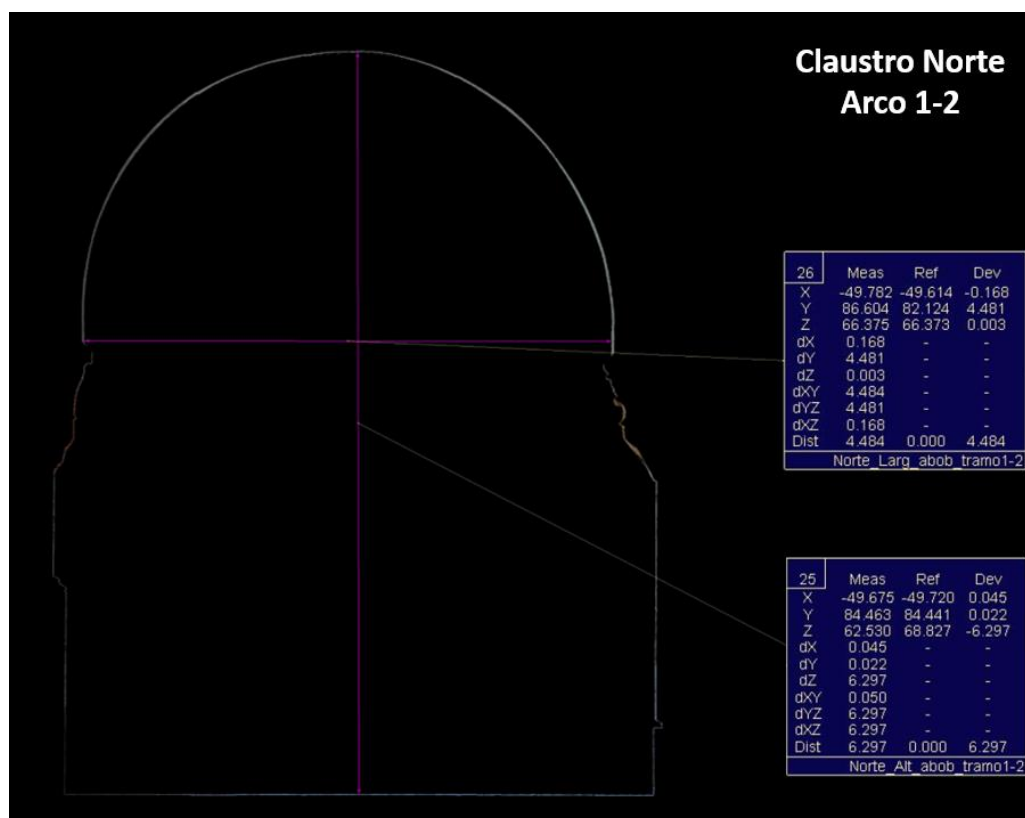


Figura 136 – Corte transversal do Arco 1-2 do claustro Norte de D. Dinis.

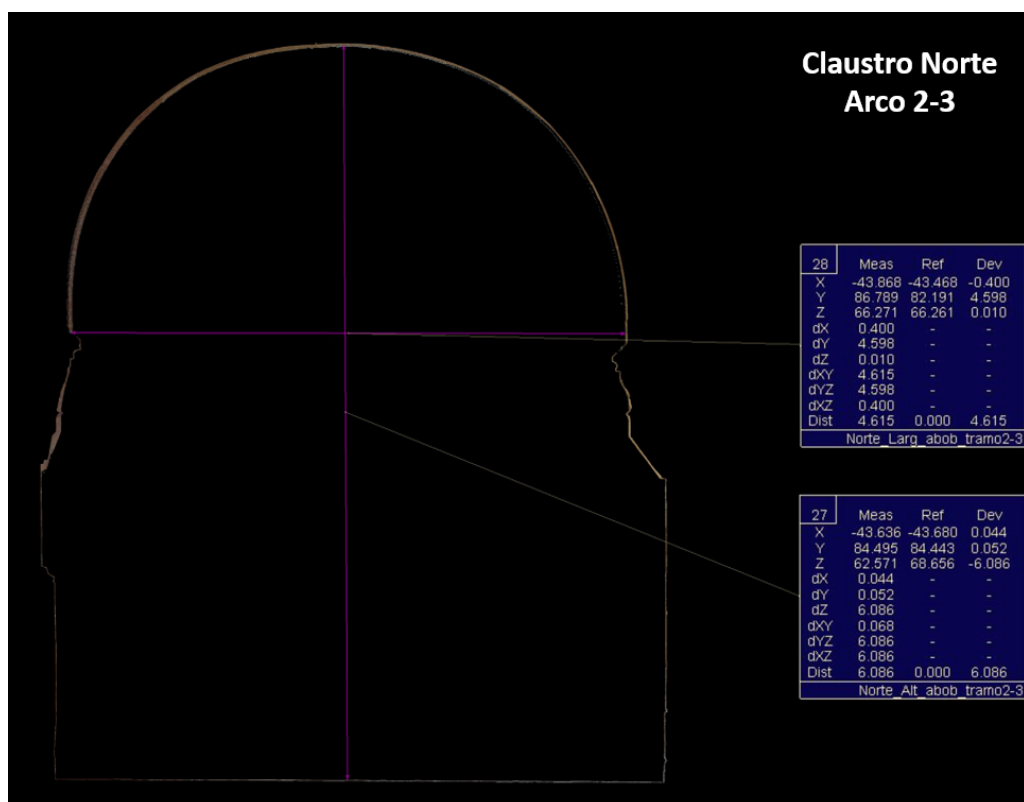


Figura 137 – Corte transversal do Arco 2-3 do claustro Norte de D. Dinis.

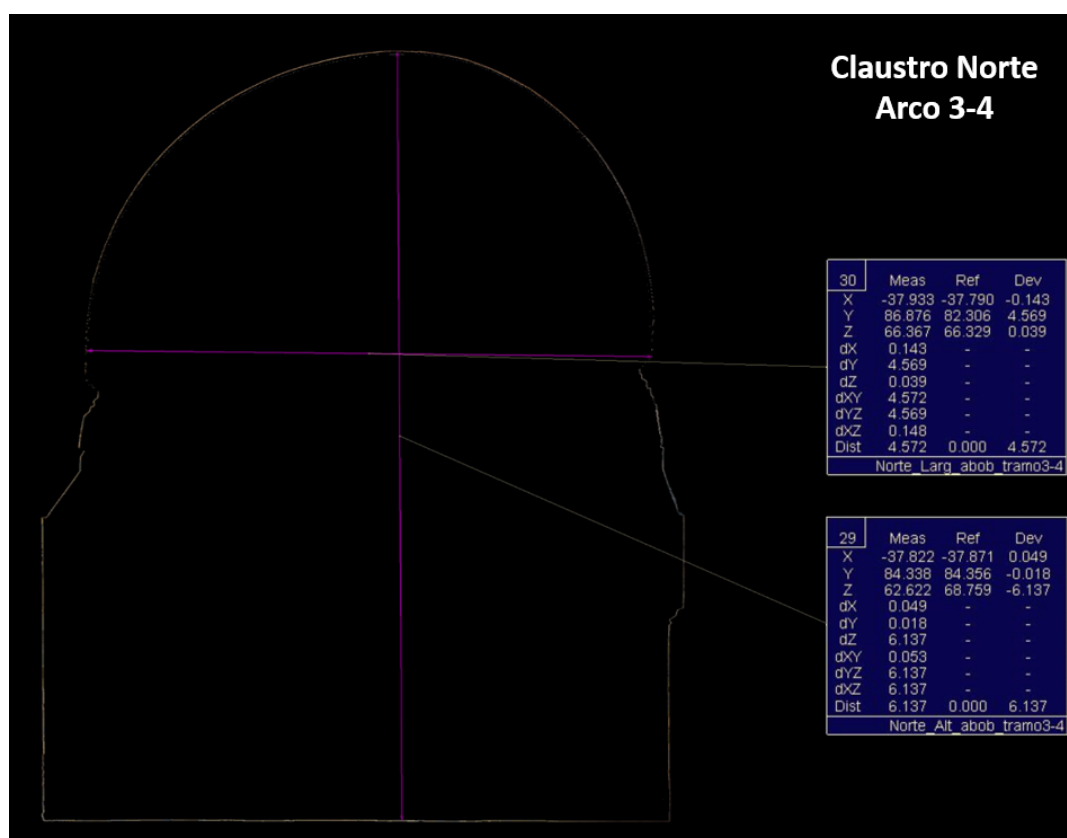


Figura 138 – Corte transversal do Arco 3-4 do claustro Norte de D. Dinis.

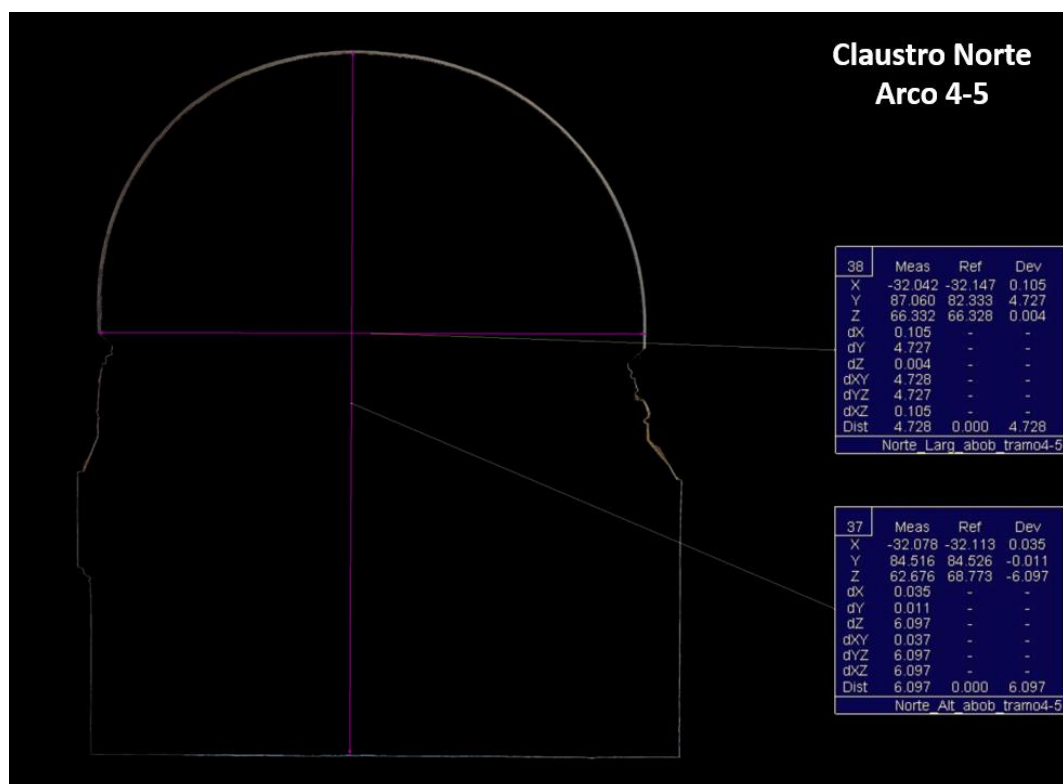


Figura 139 – Corte transversal do Arco 4-5 do claustro Norte de D. Dinis.

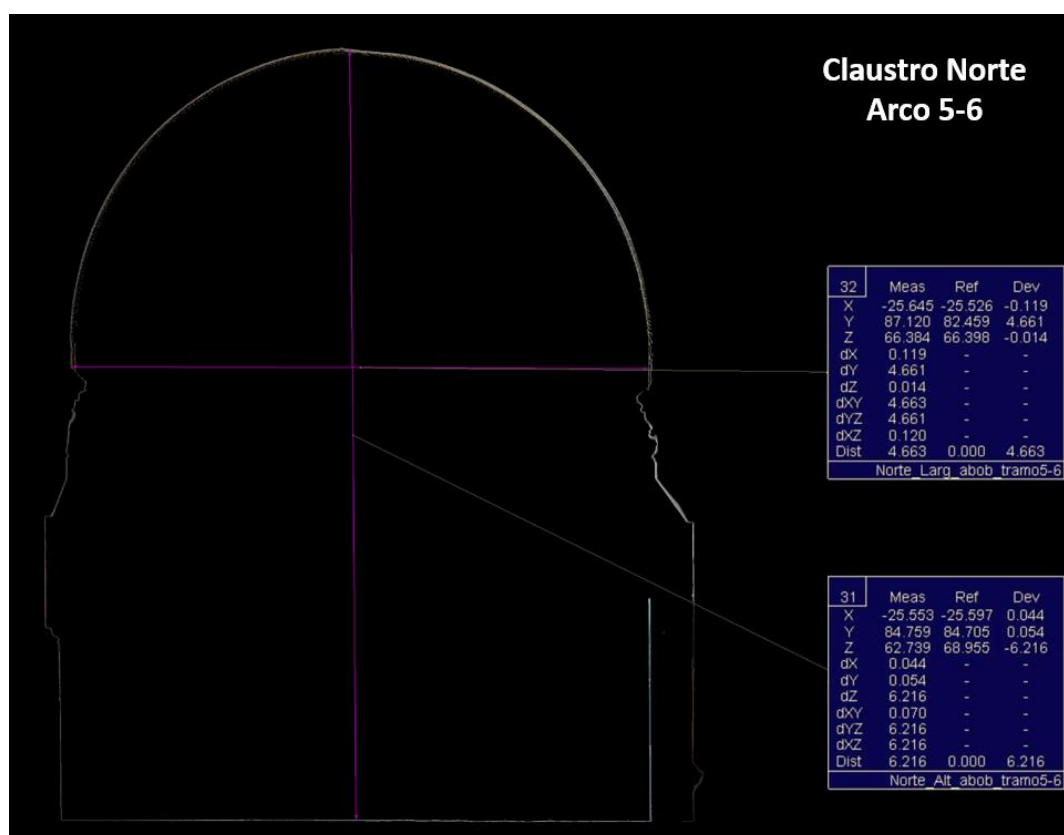


Figura 140 – Corte transversal do Arco 5-6 do claustro Norte de D. Dinis.

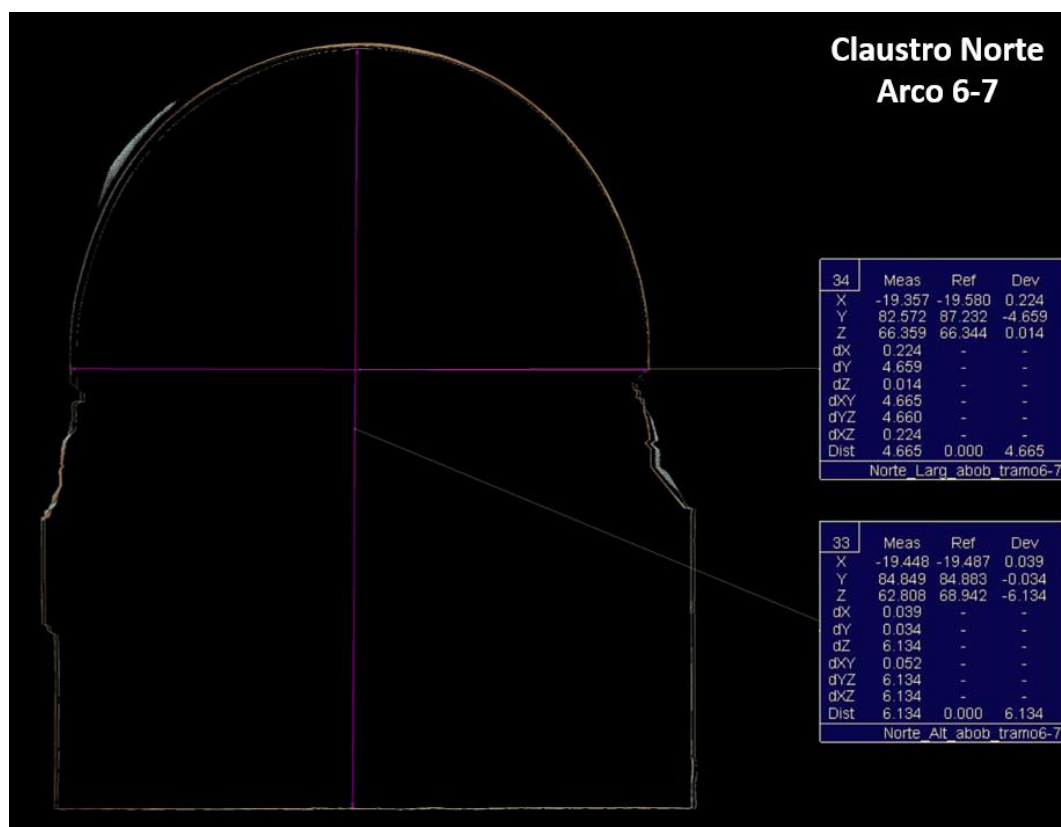


Figura 141 – Corte transversal do Arco 6-7 do claustro Norte de D. Dinis.

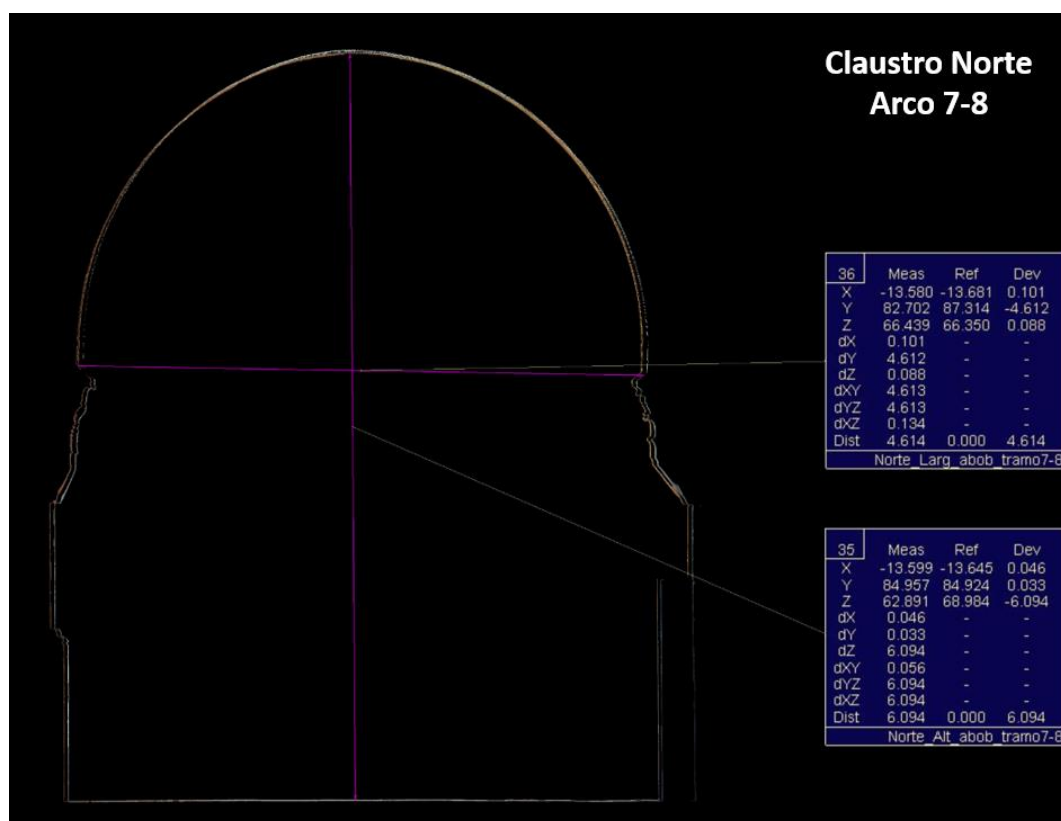


Figura 142 – Corte transversal do Arco 7-8 do claustro Norte de D. Dinis.

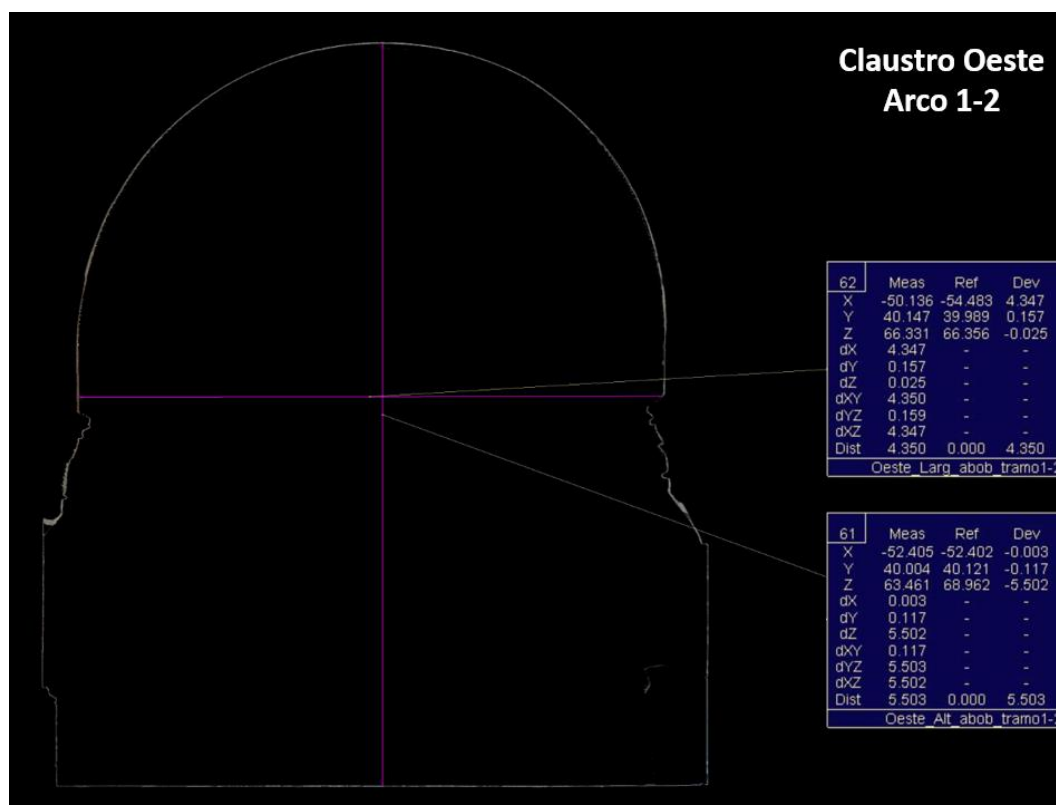


Figura 143 – Corte transversal do Arco 1-2 do claustro Oeste de D. Dinis.

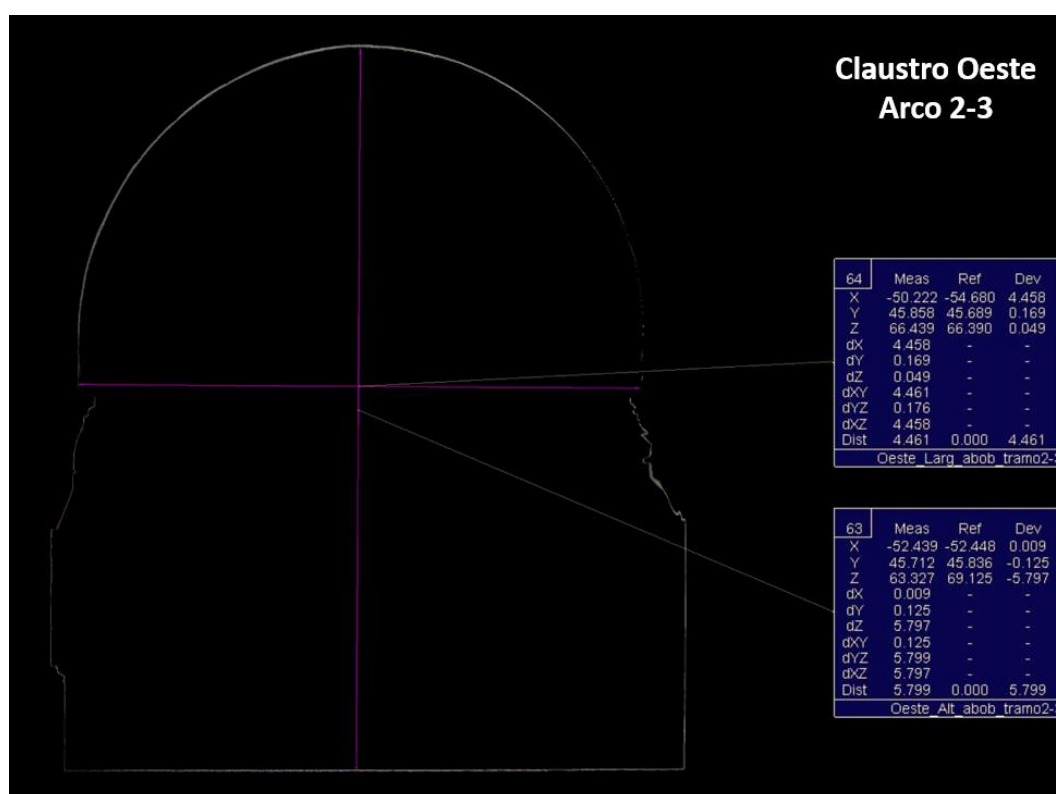


Figura 144 – Corte transversal do Arco 2-3 do claustro Oeste de D. Dinis.

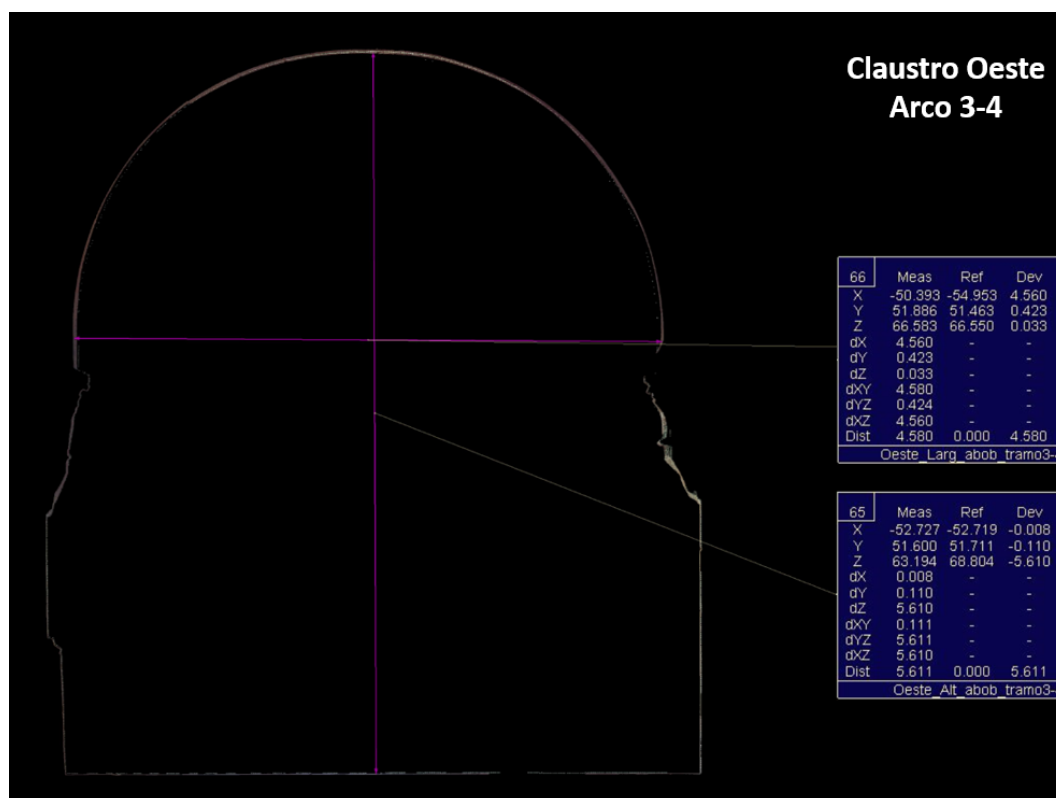


Figura 145 – Corte transversal do Arco 3-4 do claustro Oeste de D. Dinis.



Figura 146 – Corte transversal do Arco 4-5 do claustro Oeste de D. Dinis.

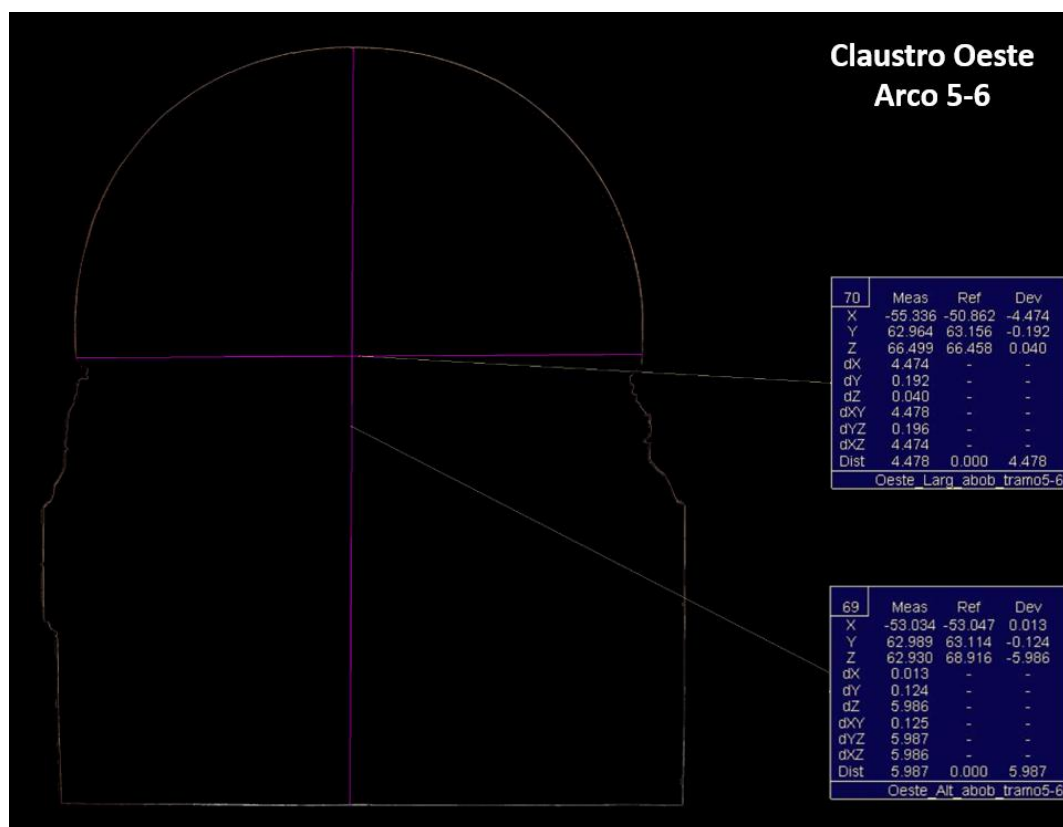


Figura 147 – Corte transversal do Arco 5-6 do claustro Oeste de D. Dinis.

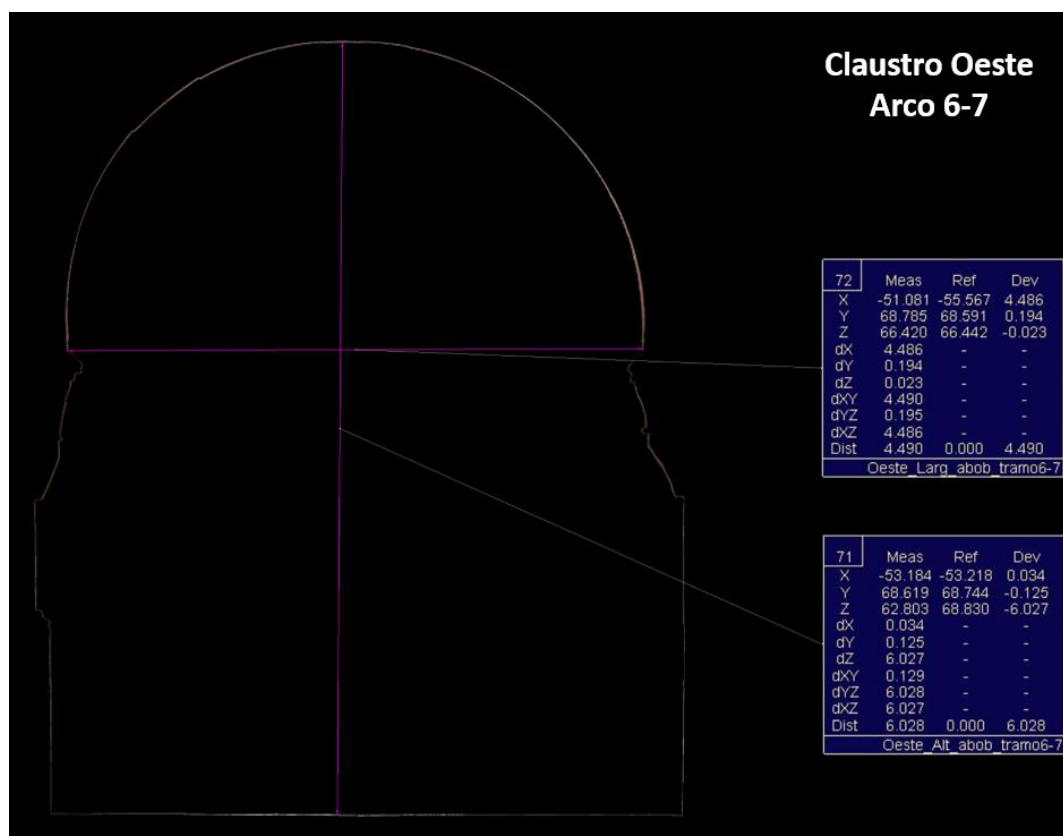


Figura 148 – Corte transversal do Arco 6-7 do claustro Oeste de D. Dinis.

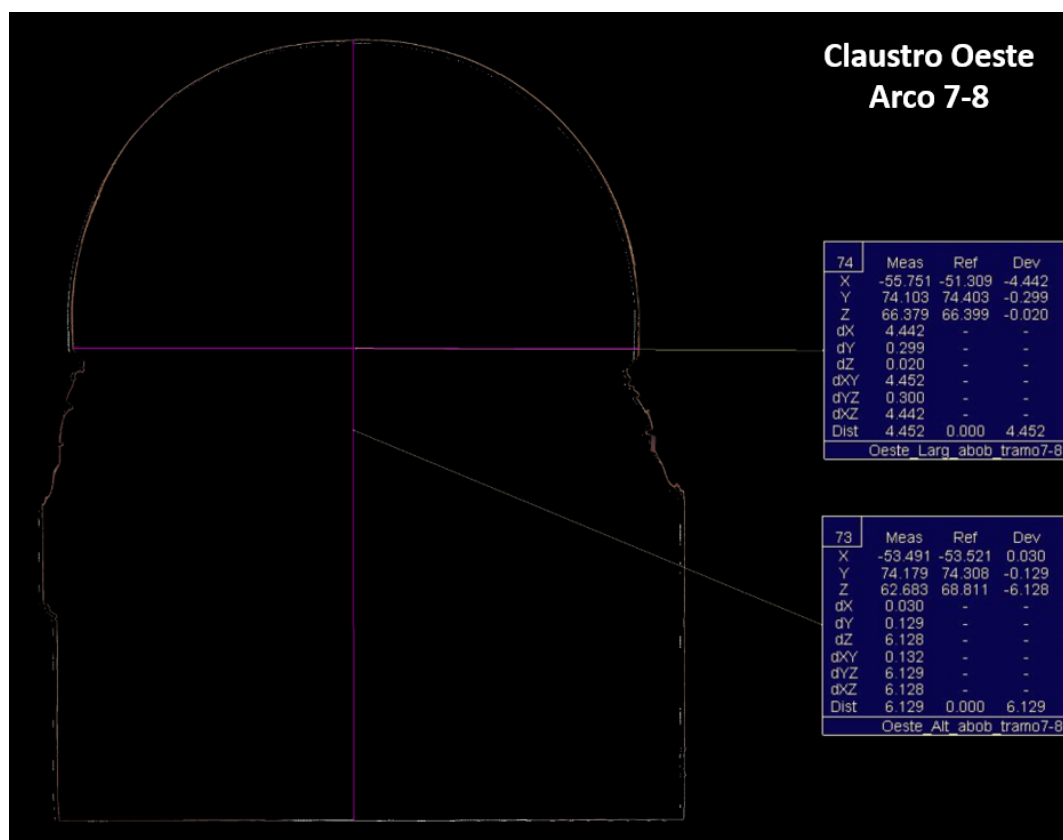


Figura 149 – Corte transversal do Arco 7-8 do claustro Oeste de D. Dinis.

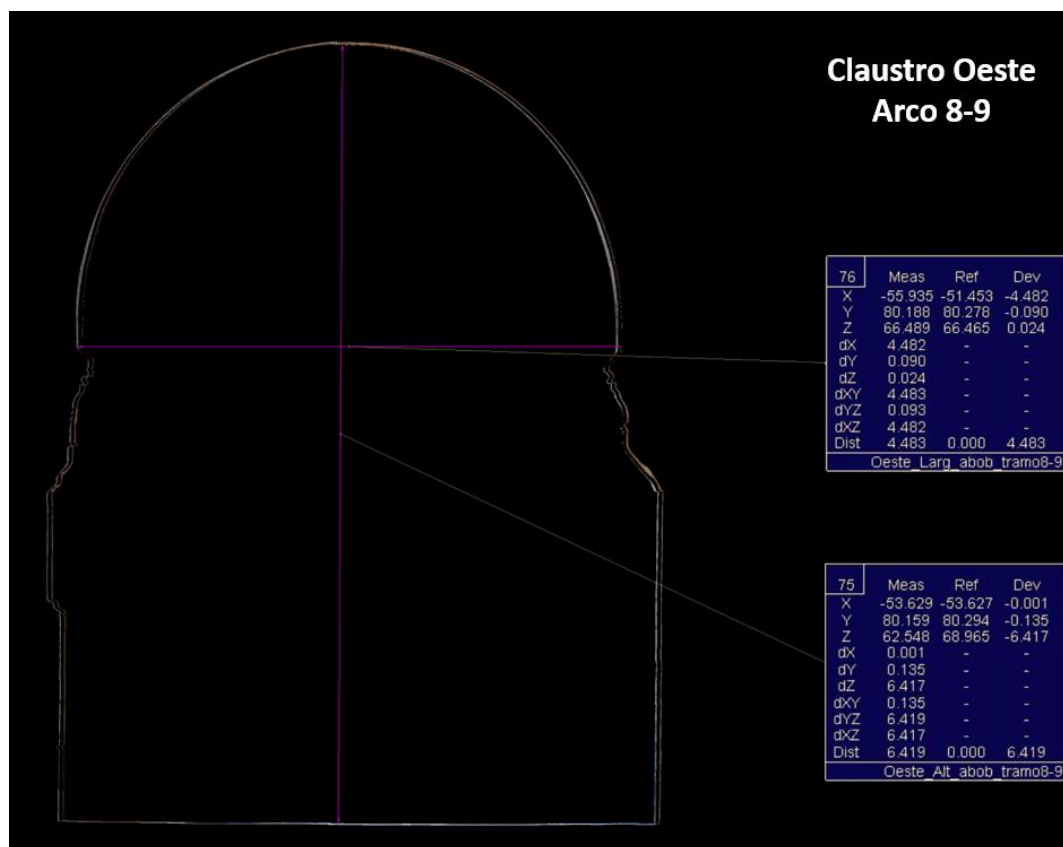


Figura 150 – Corte transversal do Arco 8-9 do claustro Oeste de D. Dinis.



Figura 151 – Corte transversal do Arco 1-2 do claustro Sul de D. Dinis.

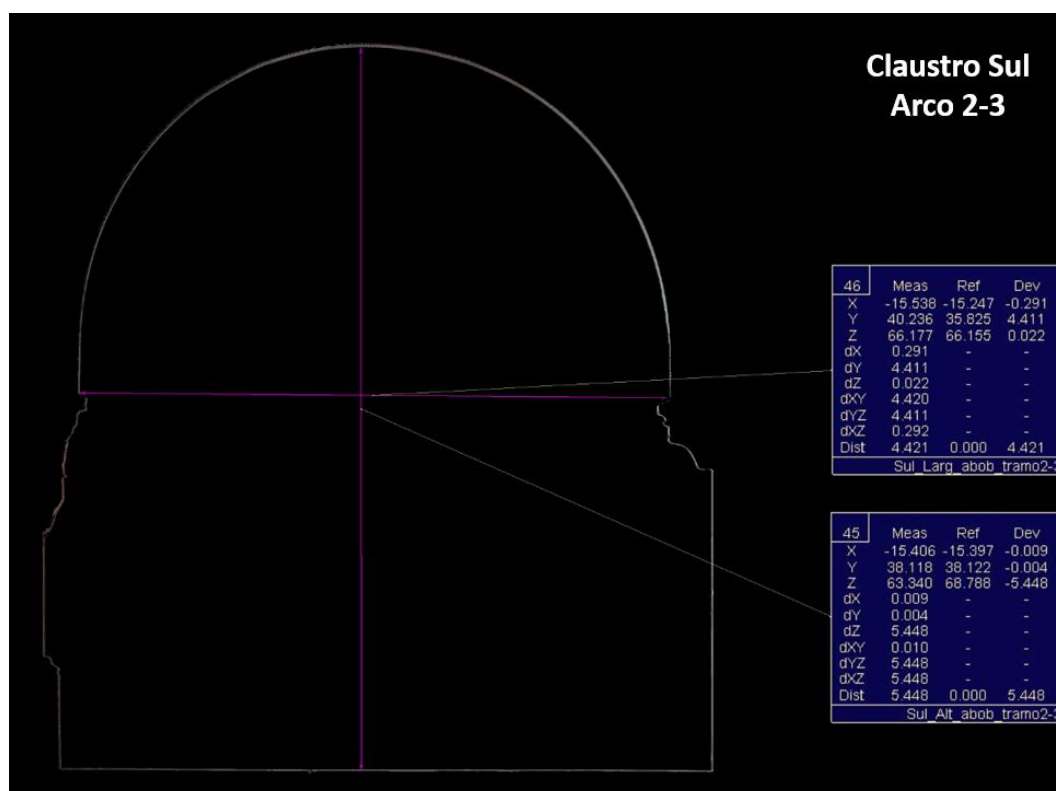


Figura 152 – Corte transversal do Arco 2-3 do claustro Sul de D. Dinis.

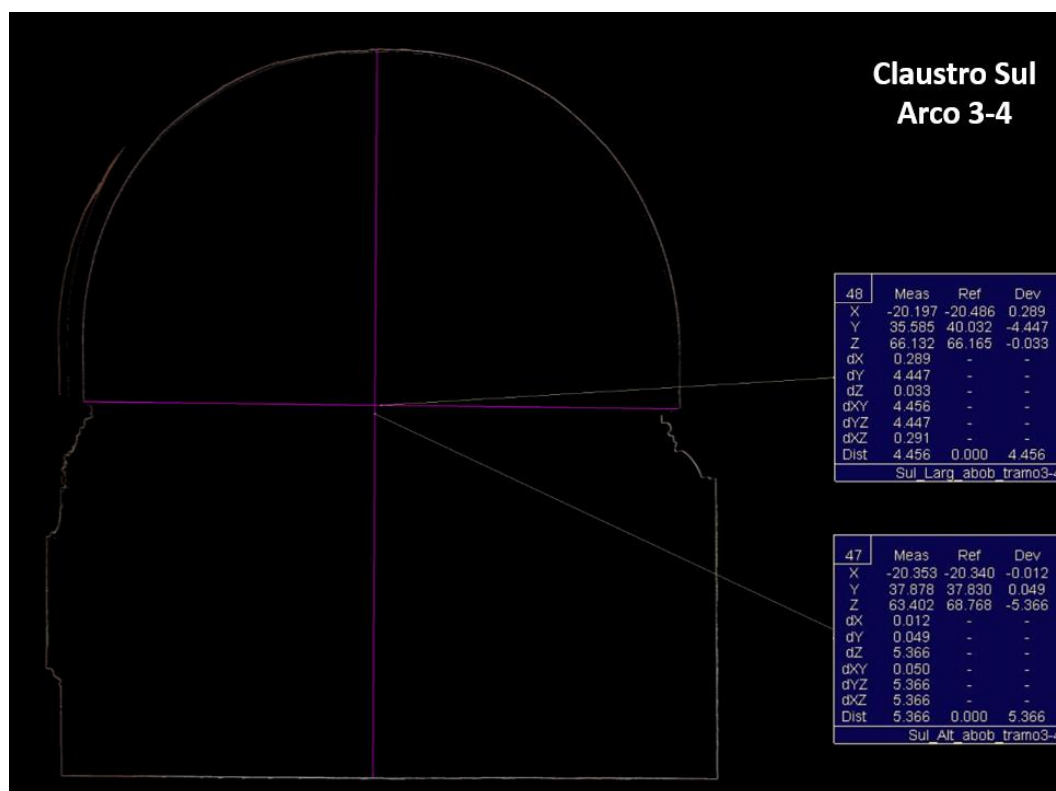


Figura 153 – Corte transversal do Arco 3-4 do claustro Sul de D. Dinis.

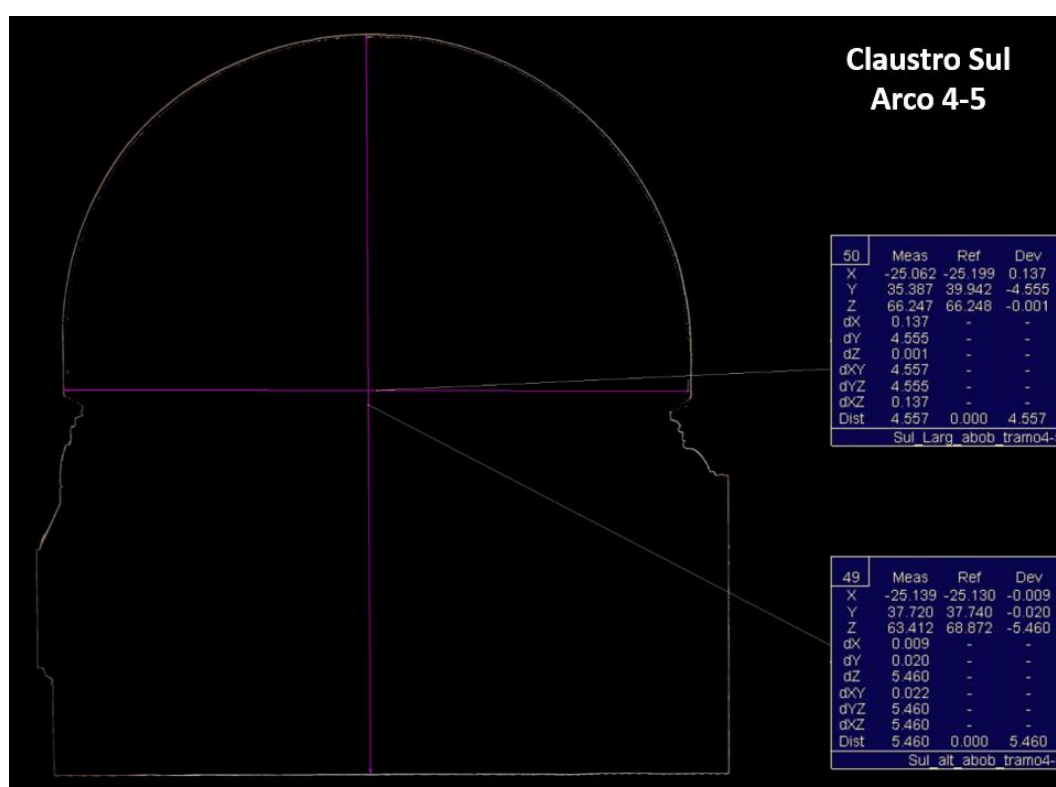


Figura 154 – Corte transversal do Arco 4-5 do claustro Sul de D. Dinis.

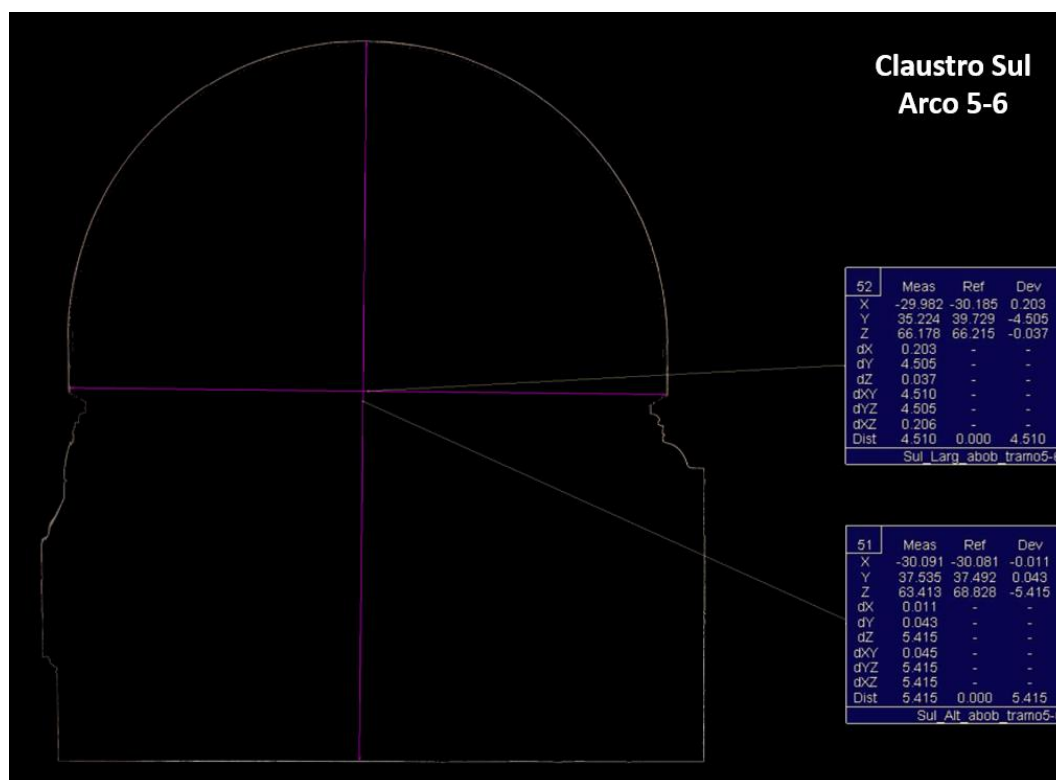


Figura 155 – Corte transversal do Arco 5-6 do claustro Sul de D. Dinis.

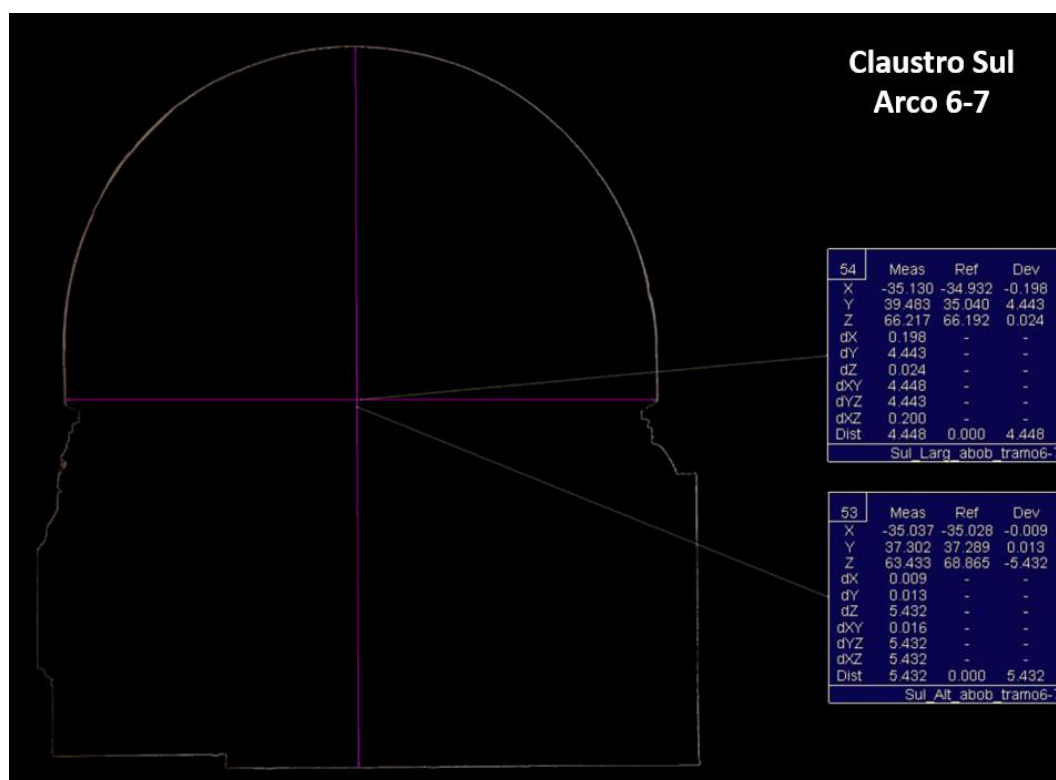


Figura 156 – Corte transversal do Arco 6-7 do claustro Sul de D. Dinis.

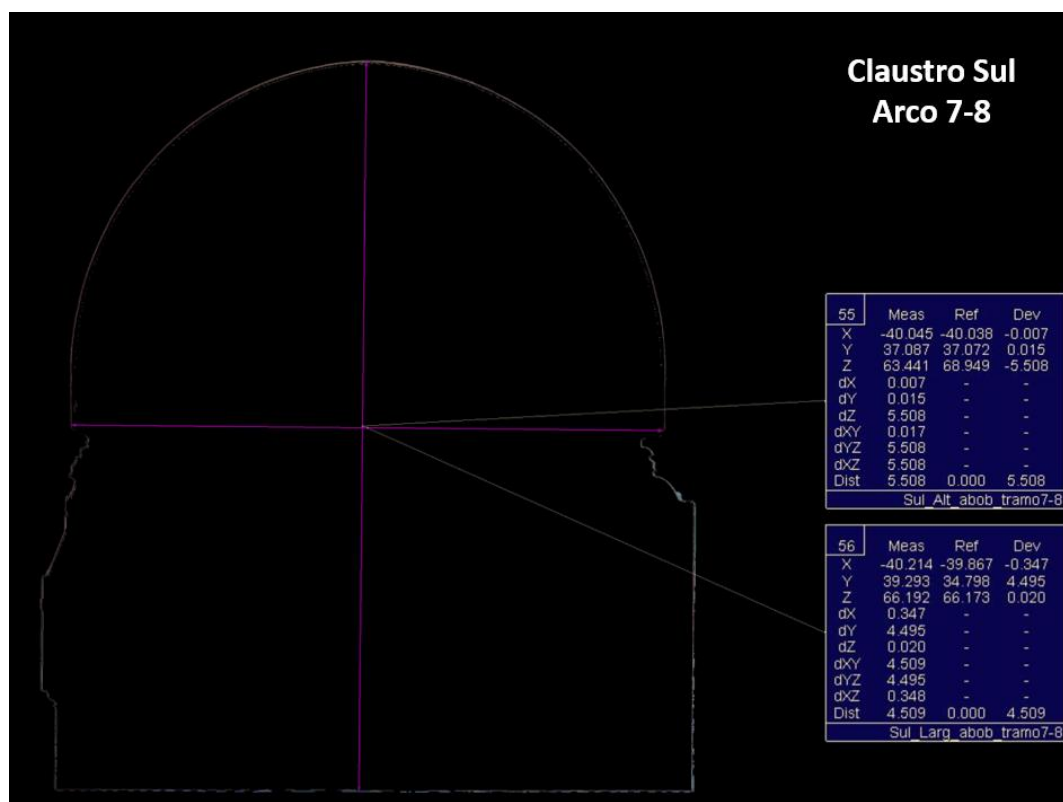


Figura 157 – Corte transversal do Arco 7-8 do claustro Sul de D. Dinis.

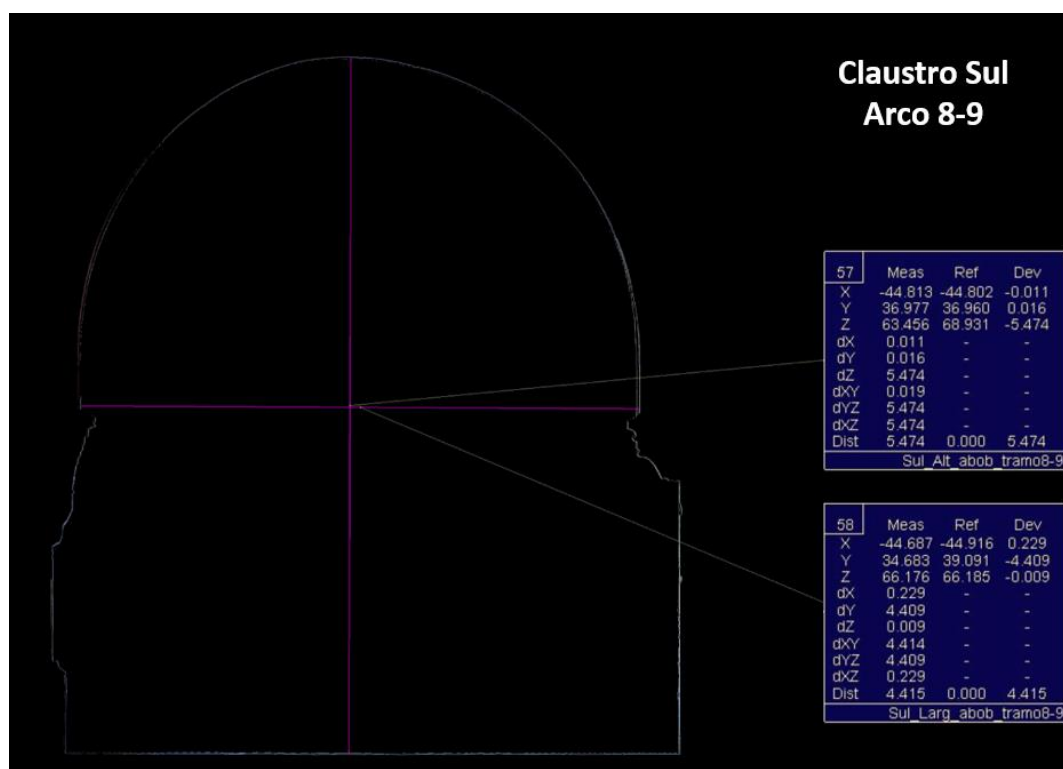


Figura 158 – Corte transversal do Arco 8-9 do claustro Sul de D. Dinis.

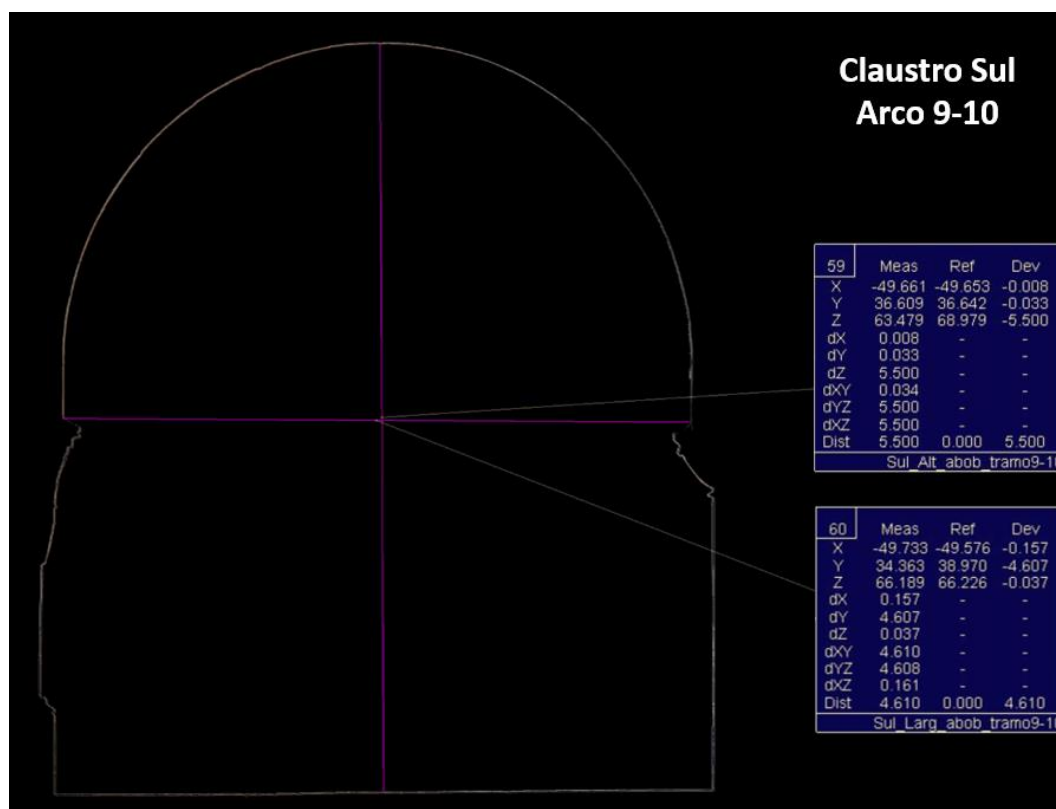


Figura 159 – Corte transversal do Arco 9-10 do claustro Sul de D. Dinis.

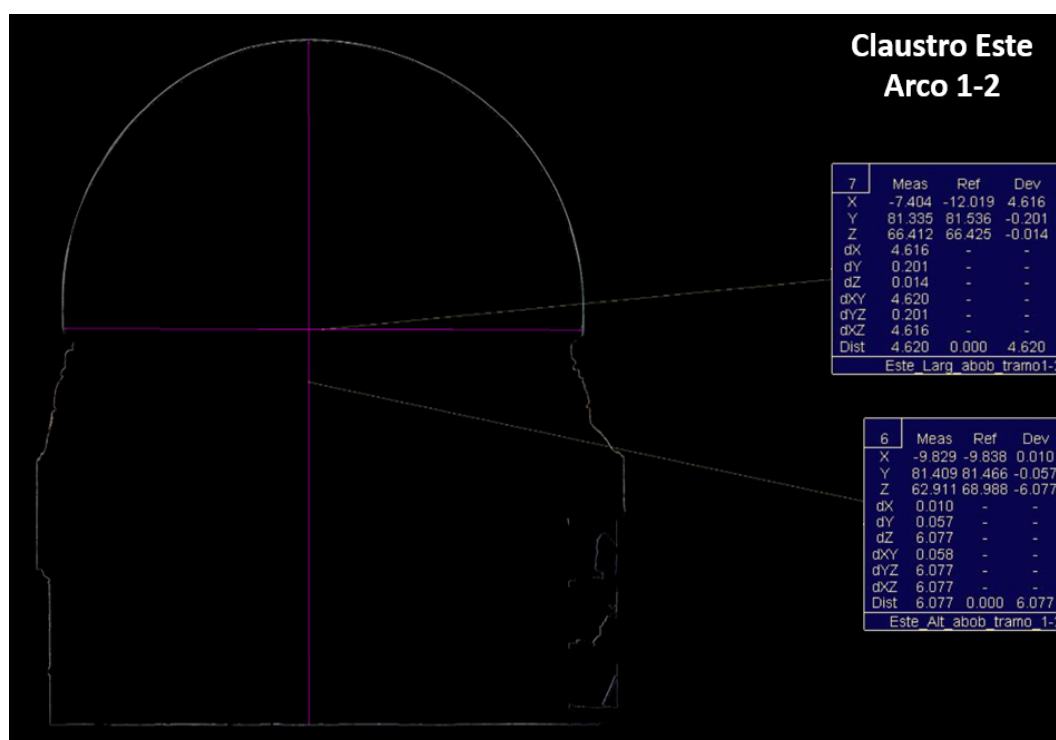


Figura 160 – Corte transversal do Arco 1-2 do claustro Este de D. Dinis.

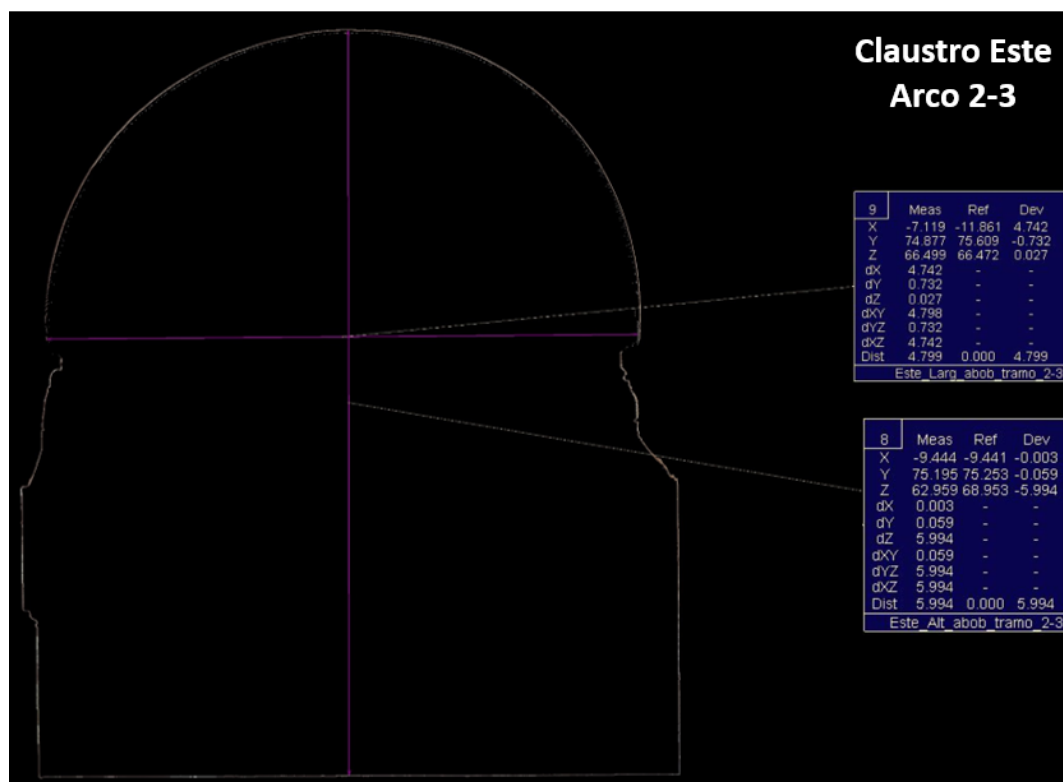


Figura 161 – Corte transversal do Arco 2-3 do claustro Este de D. Dinis.

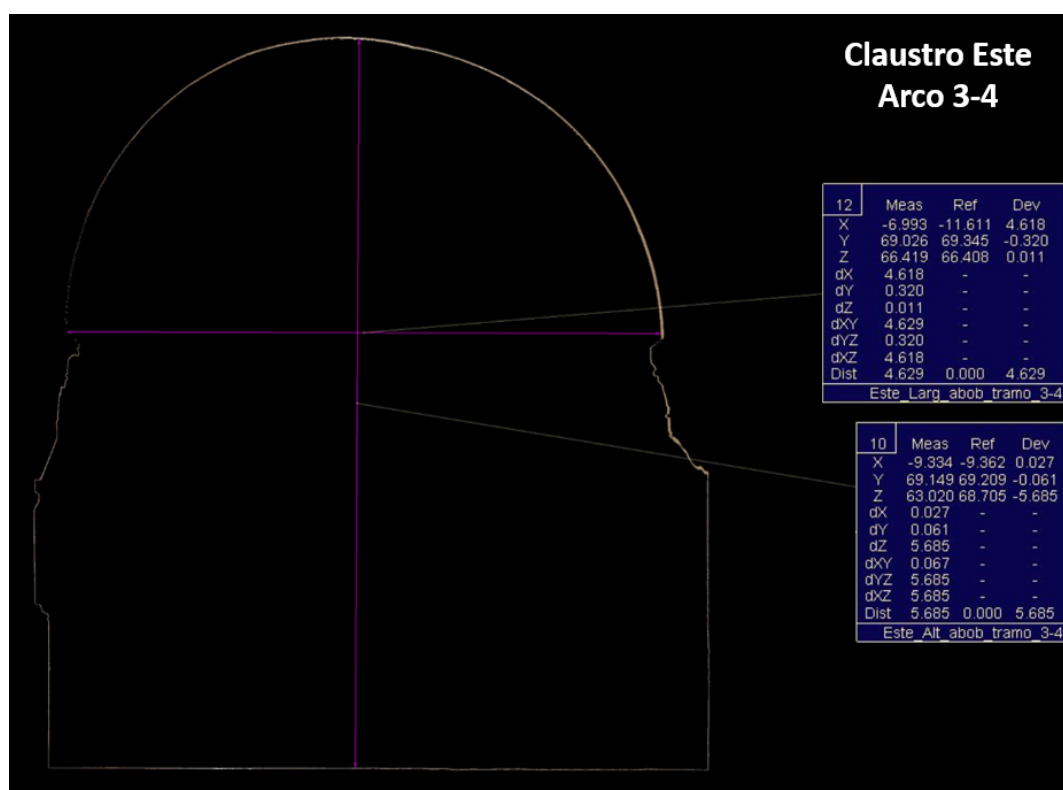


Figura 162 – Corte transversal do Arco 3-4 do claustro Este de D. Dinis.

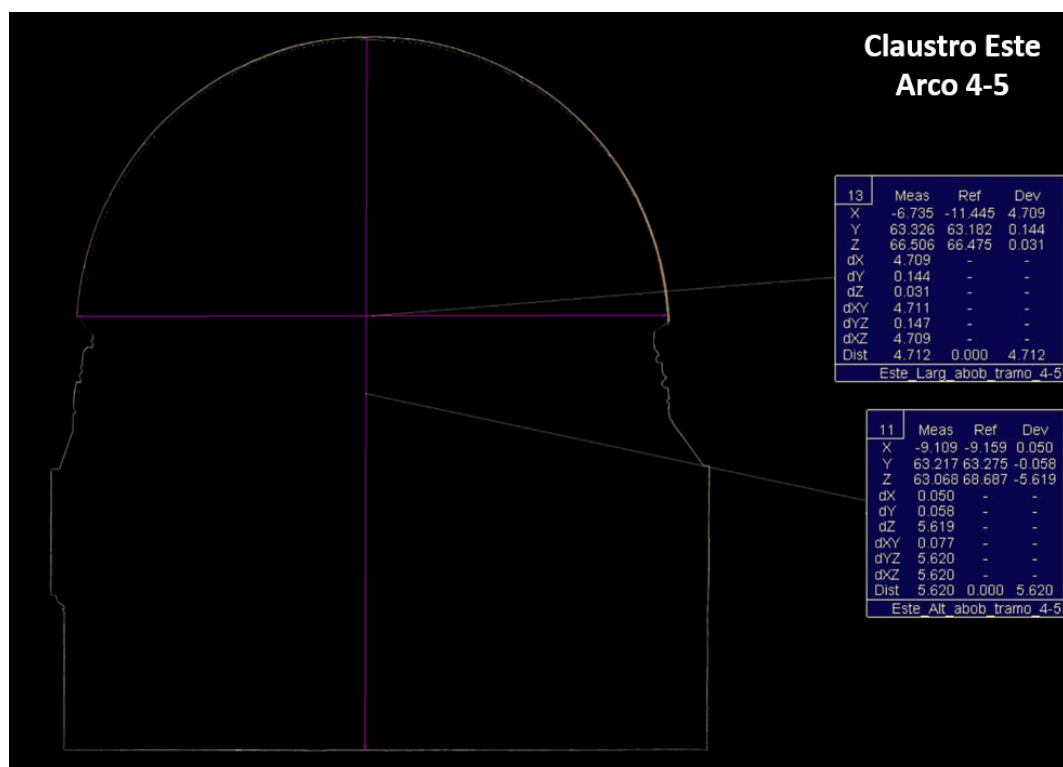


Figura 163 – Corte transversal do Arco 4-5 do claustro Este de D. Dinis.

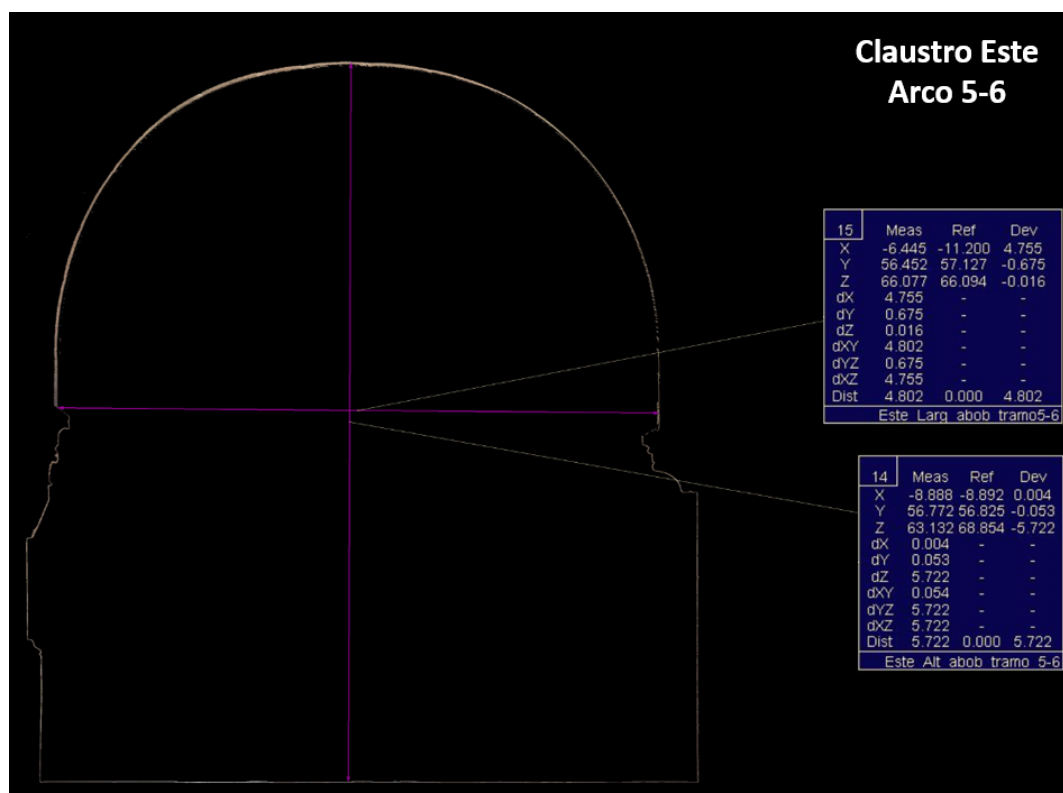


Figura 164 – Corte transversal do Arco 5-6 do claustro Este de D. Dinis.

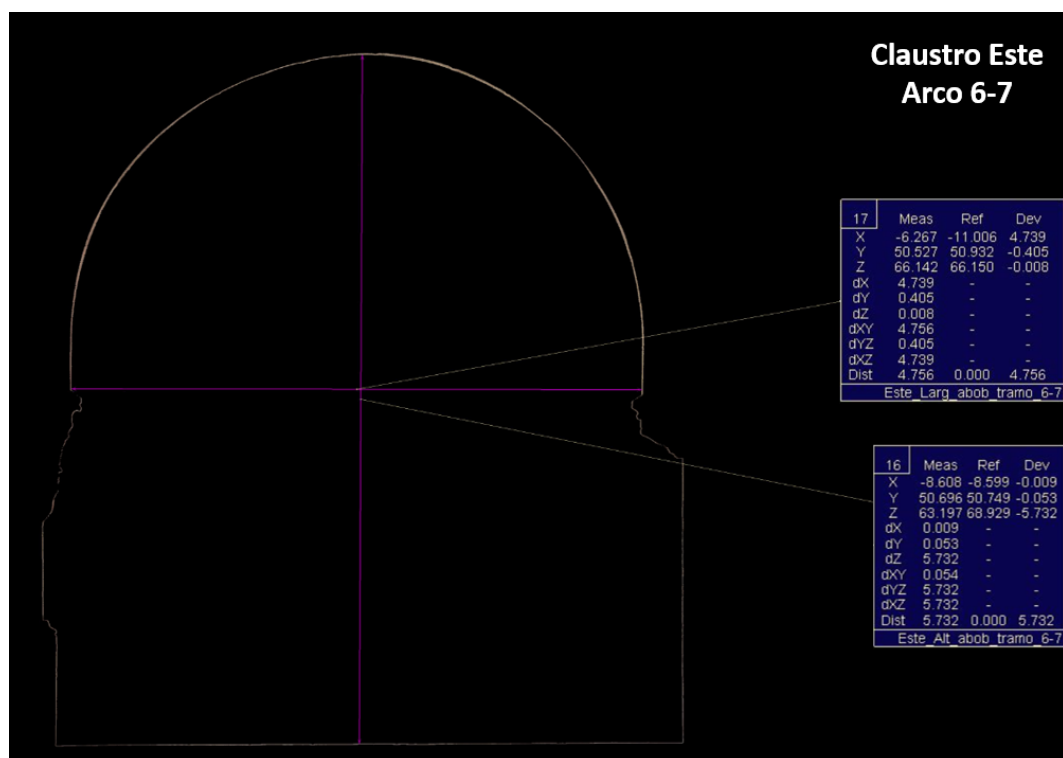


Figura 165 – Corte transversal do Arco 6-7 do claustro Este de D. Dinis.

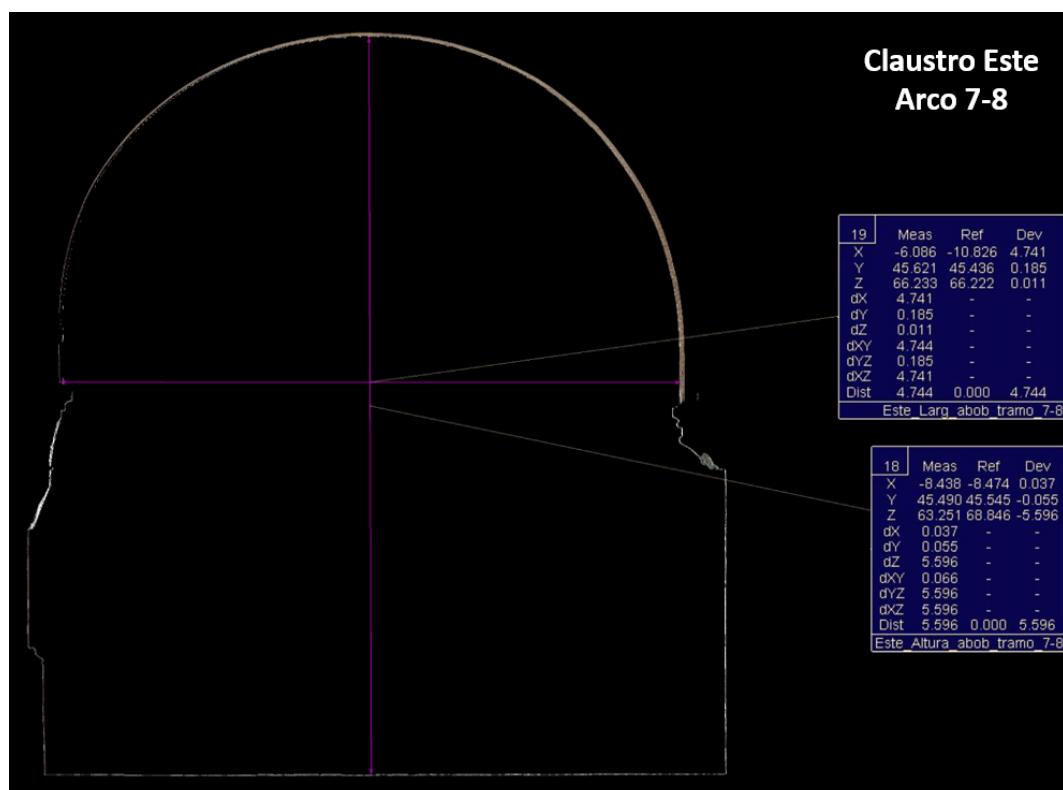


Figura 166 – Corte transversal do Arco 7-8 do claustro Este de D. Dinis.

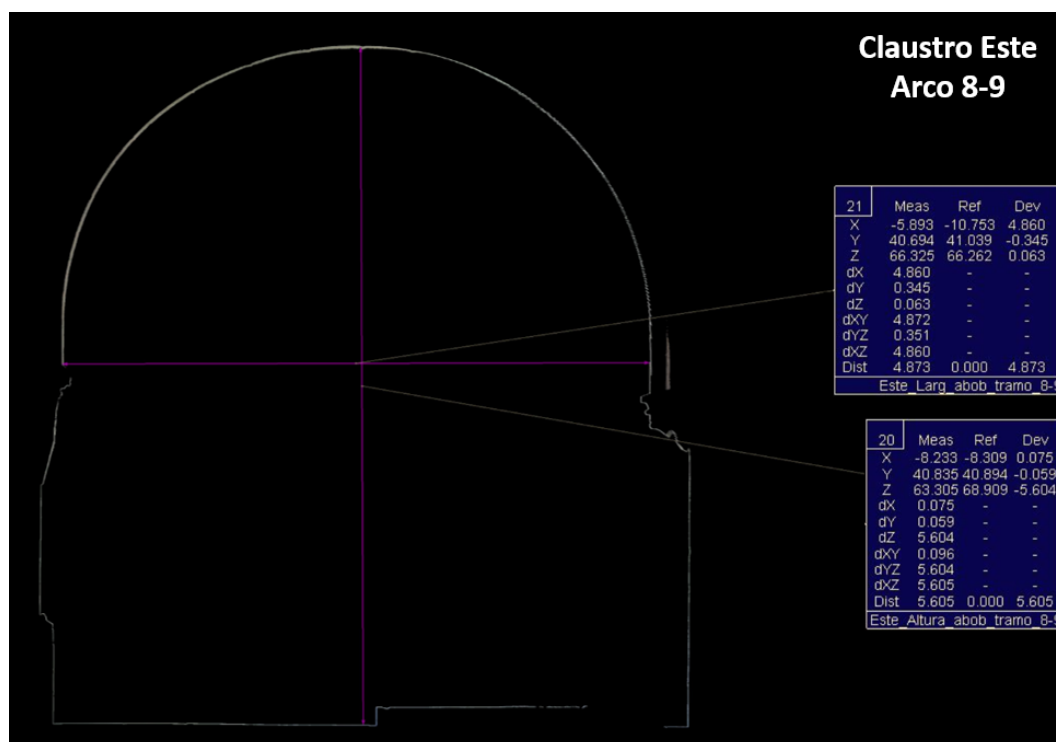


Figura 167 – Corte transversal do Arco 8-9 do claustro Este de D. Dinis.

ANEXO E – Superfícies 3D das abóbadas do Claustro de D. Dinis (ou Claustro do Silêncio) e respectivas curvas de nível

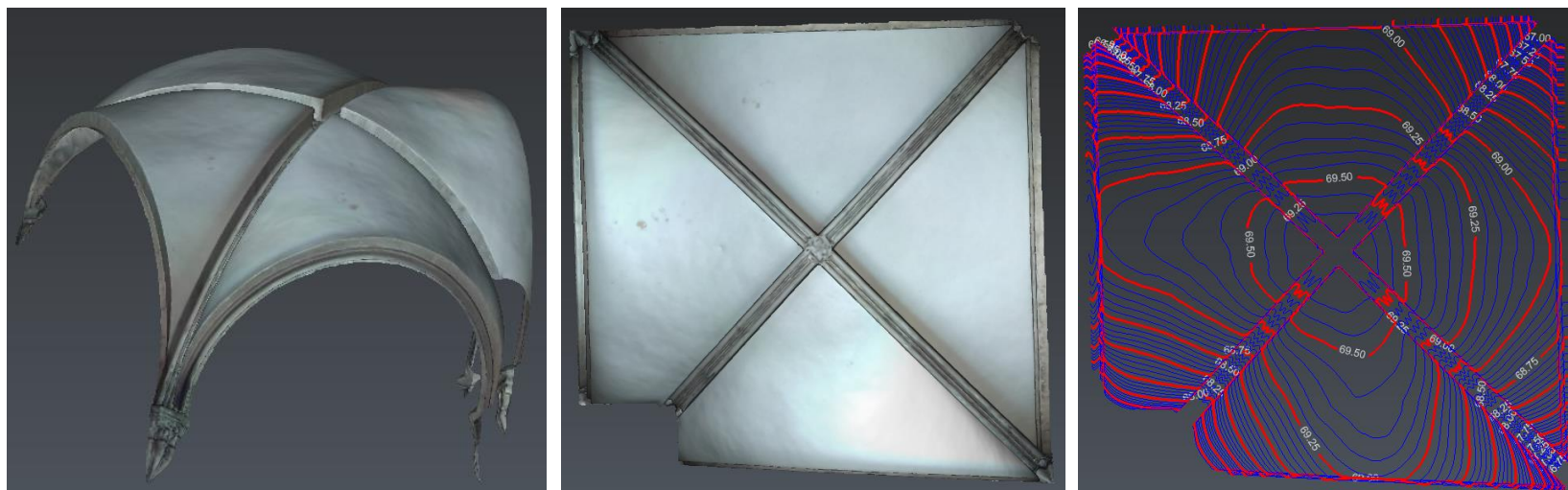


Figura 168 – Superfície 3D da abóbada 1 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 169 – Superfície 3D da abóbada 2 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 170 – Superfície 3D da abóbada 3 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 171 – Superfície 3D da abóbada 4 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 172 – Superfície 3D da abóbada 5 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 173 – Superfície 3D da abóbada 6 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 174 – Superfície 3D da abóbada 7 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 175 – Superfície 3D da abóbada 8 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.

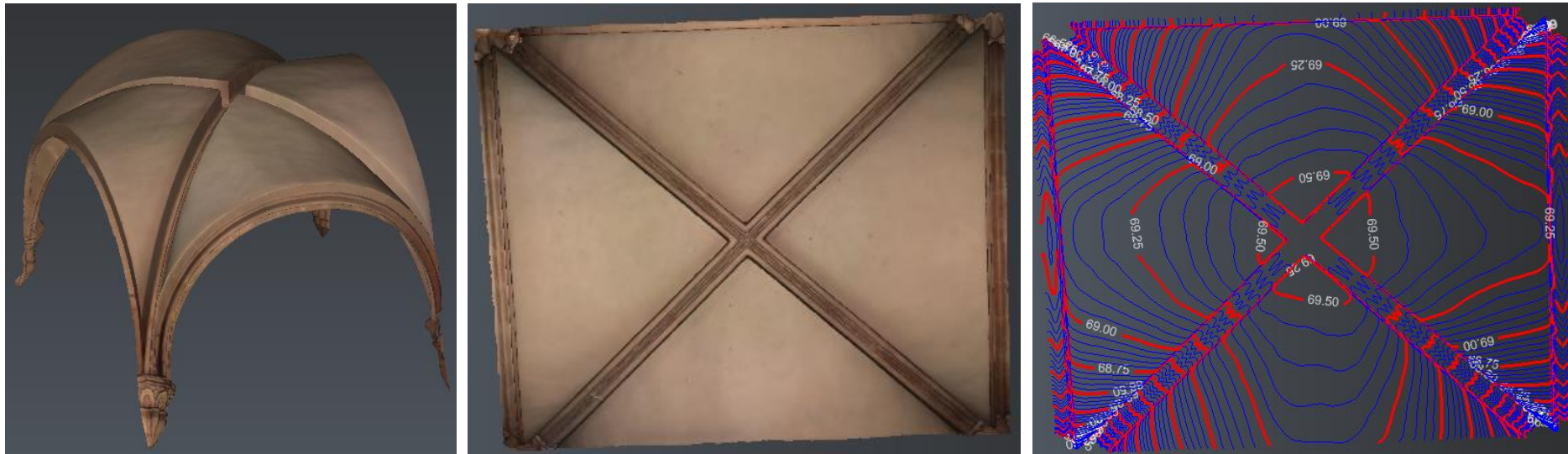


Figura 176 – Superfície 3D da abóbada 9 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.

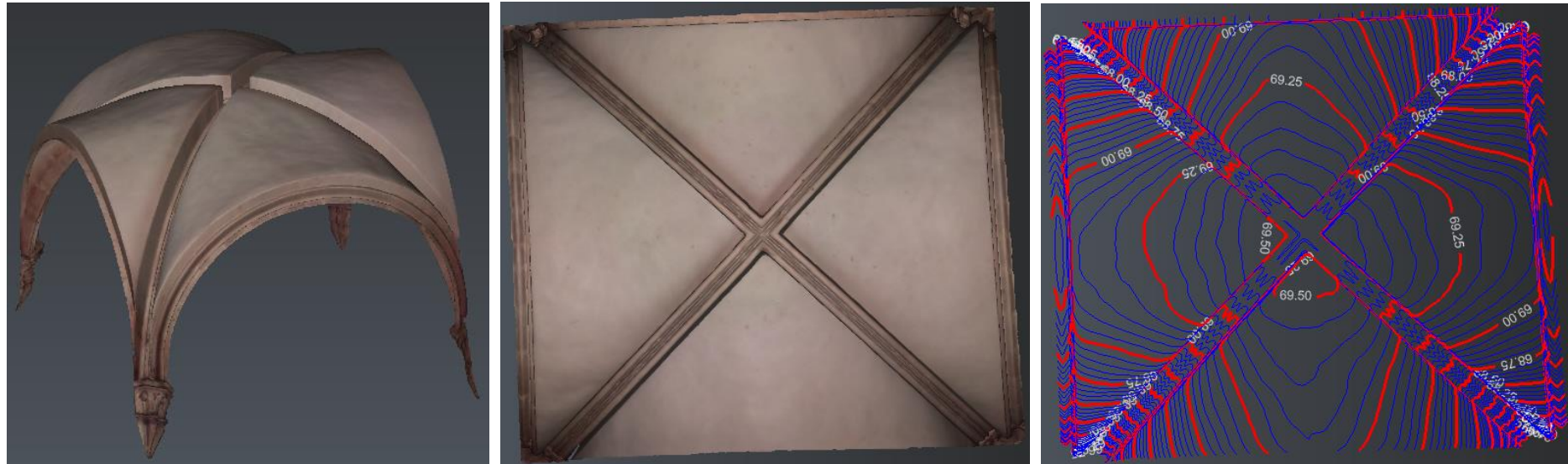


Figura 177 – Superfície 3D da abóbada 10 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 178 – Superfície 3D da abóbada 11 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.

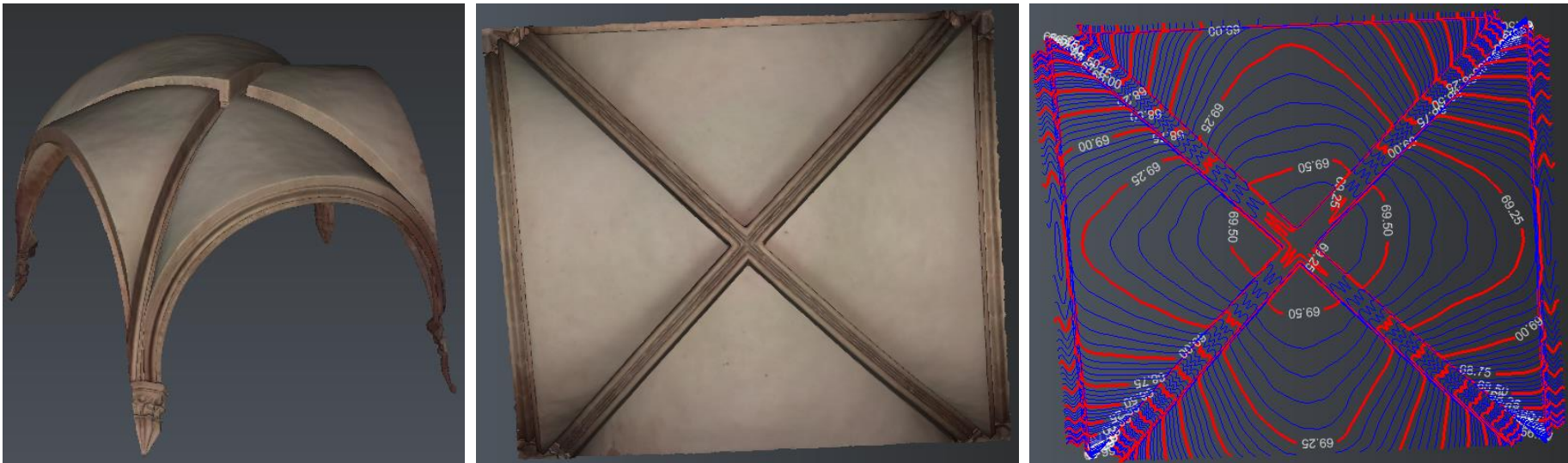


Figura 179 – Superfície 3D da abóbada 12 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 180 – Superfície 3D da abóbada 13 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 181 – Superfície 3D da abóbada 14 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.

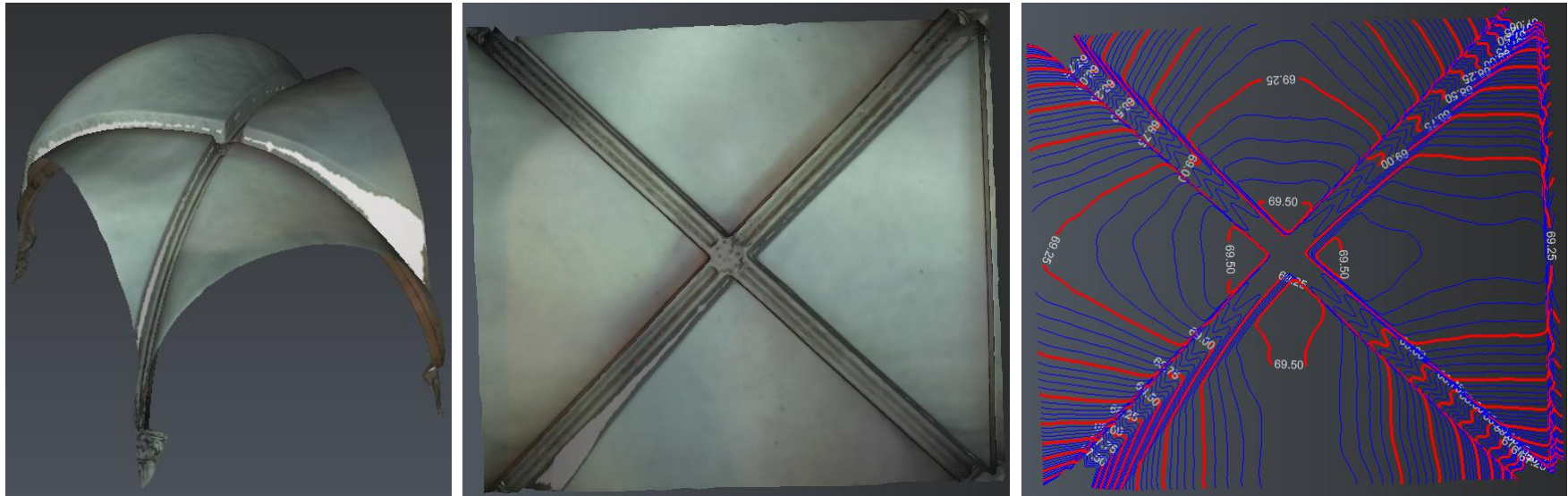


Figura 182 – Superfície 3D da abóbada 15 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 183 – Superfície 3D da abóbada 16 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 184 – Superfície 3D da abóbada 17 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 185 – Superfície 3D d abóbada 18 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 186 – Superfície 3D da abóbada 19 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 187 – Superfície 3D da abóbada 20 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 188 – Superfície 3D da abóbada 21 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 189 – Superfície 3D da abóbada 22 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.

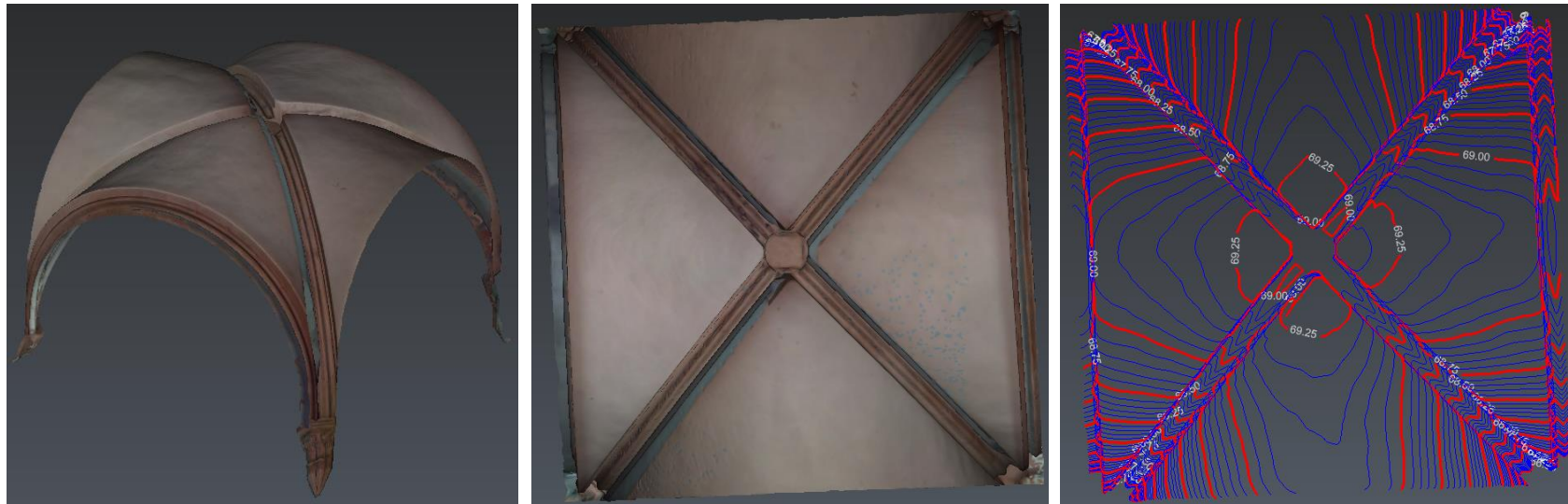


Figura 190 – Superfície 3D da abóbada 23 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 191 – Superfície 3D da abóbada 24 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 192 – Superfície 3D da abóbada 25 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 193 – Superfície 3D da abóbada 26 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 194 – Superfície 3D da abóbada 27 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 195 – Superfície 3D da abóbada 28 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 196 – Superfície 3D da abóbada 29 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 197 – Superfície 3D da abóbada 30 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.



Figura 198 – Superfície 3D da abóbada 31 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.

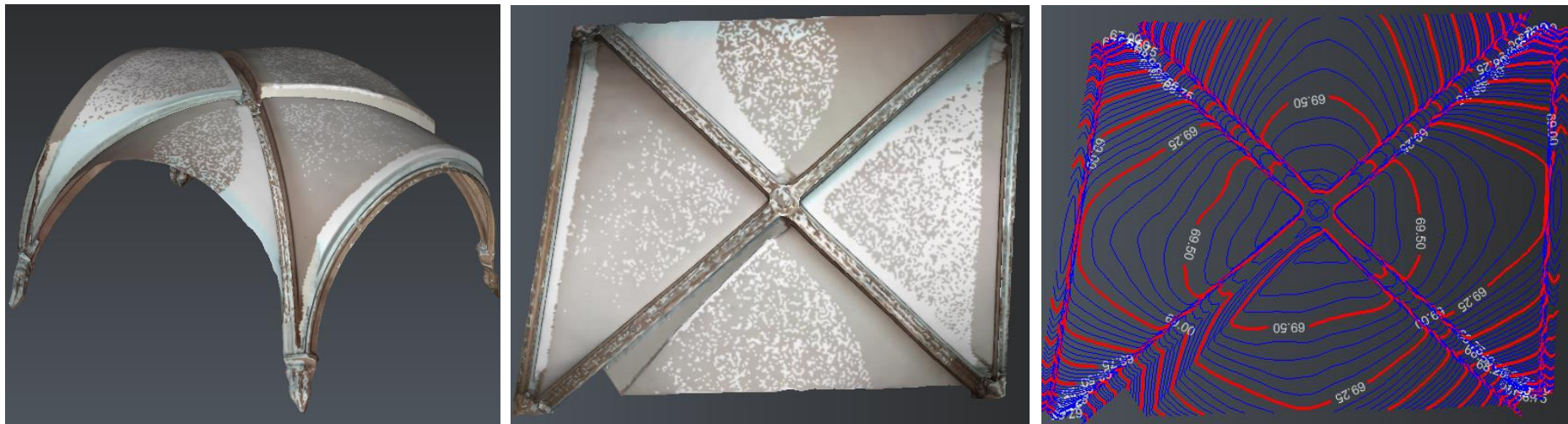


Figura 199 – Superfície 3D da abóbada 32 do Claustro de D. Dinis e respectivas curvas de nível.

ANEXO F – Cortes longitudinais para a Igreja do Mosteiro de Alcobaça

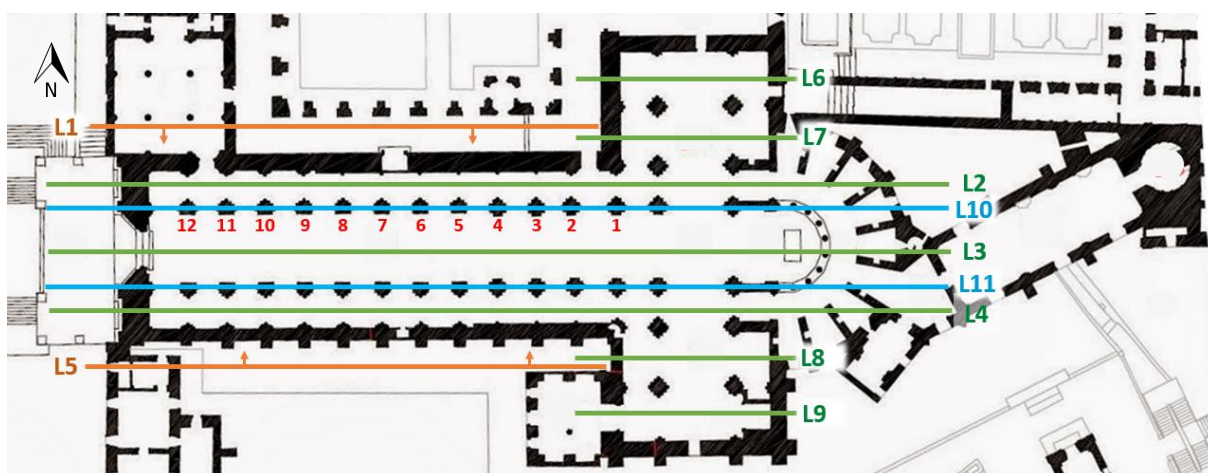


Figura 200 – Identificação dos cortes longitudinais realizados para a igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: Elaboração própria.

Fonte da planta: <https://arquitecturaycristianismo.files.wordpress.com/2016/08/15.jpg>.



Figura 201 – Identificação dos cortes longitudinais parciais realizados para a igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: Elaboração própria.

Fonte da planta: <https://arquitecturaycristianismo.files.wordpress.com/2016/08/15.jpg>.



Figura 202 – Projeção ortogonal da fachada exterior Norte da Igreja do Mosteiro de Alcobaça (L1) vista no sentido Este-Oeste.

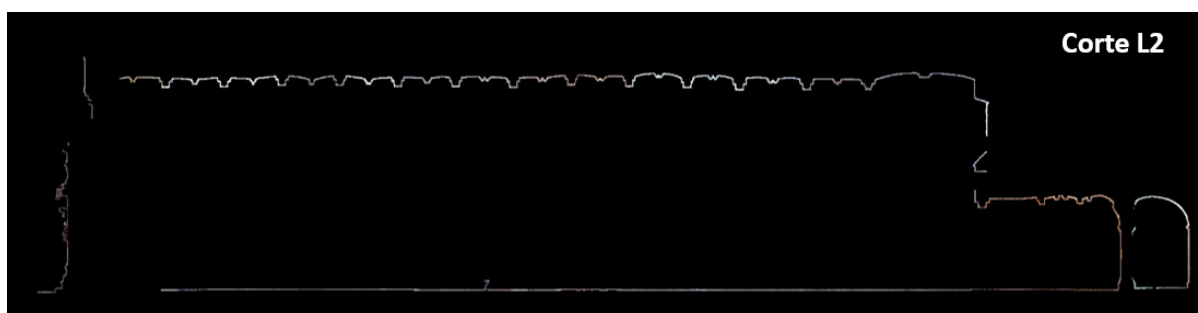


Figura 203 – Corte longitudinal na Nave Norte da Igreja (L2) do Mosteiro de Alcobaça.

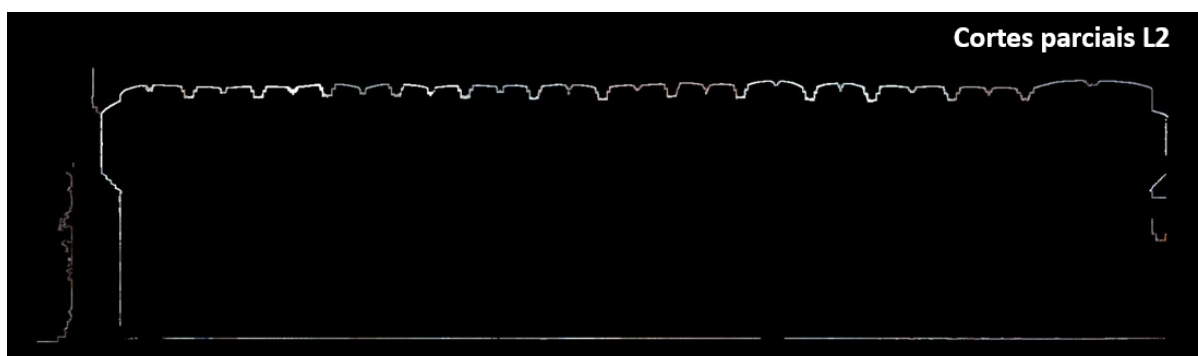


Figura 204 – Concatenação dos cortes longitudinais parciais realizados por cada duas abóbadas da Nave Norte da Igreja (cortes parciais L2) do Mosteiro de Alcobaça.

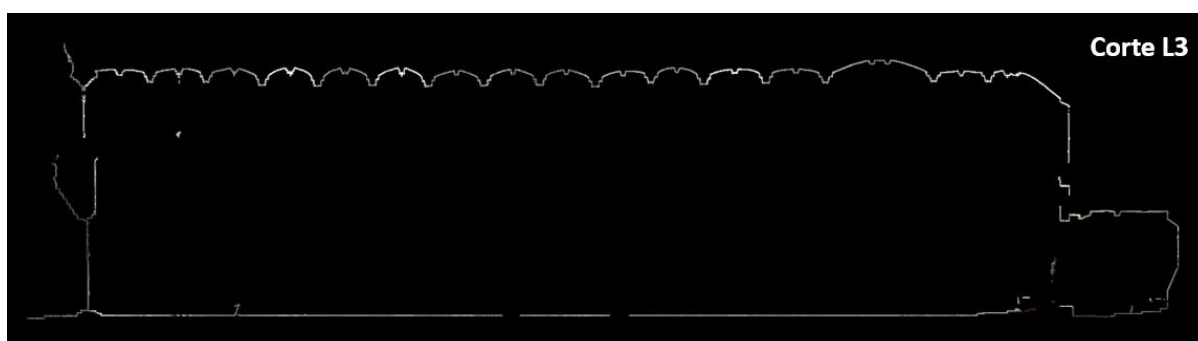


Figura 205 – Corte longitudinal na Nave Central da Igreja (L3) do Mosteiro de Alcobaça.

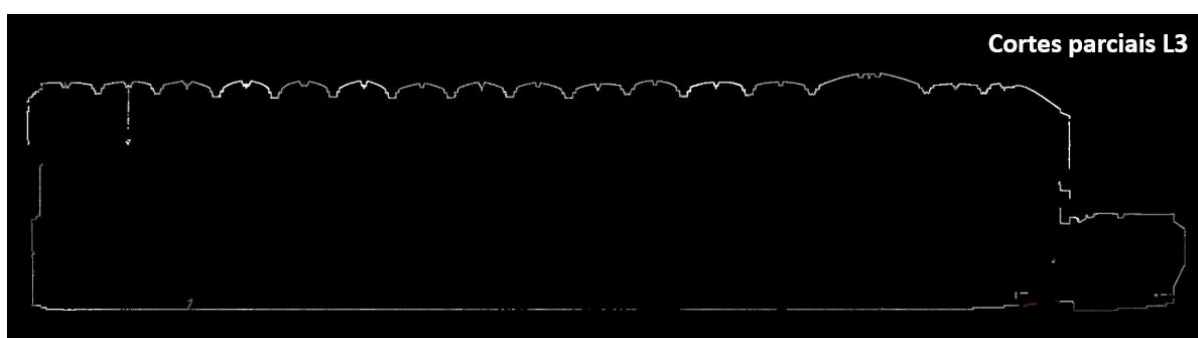


Figura 206 – Concatenação dos cortes longitudinais parciais realizados por cada duas abóbadas da Nave central da Igreja (cortes parciais L3) do Mosteiro de Alcobaça.

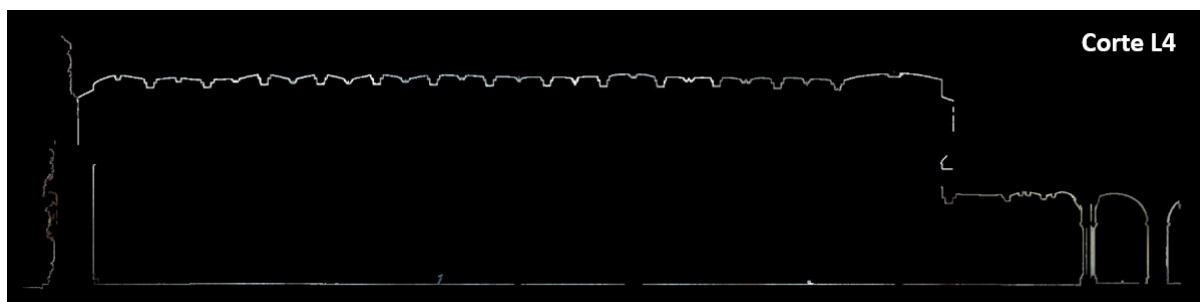


Figura 207 – Corte longitudinal na Nave Sul da Igreja (L4) do Mosteiro de Alcobaça.

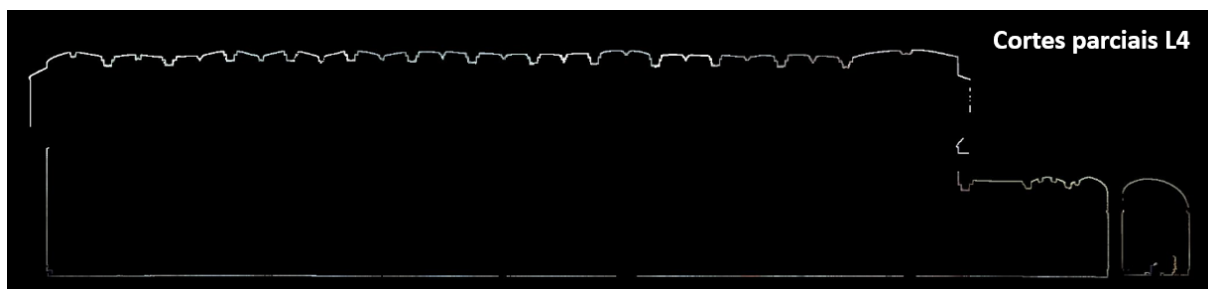


Figura 208 – Concatenação dos cortes longitudinais parciais realizados por cada duas abóbadas da Nave Sul da Igreja (cortes parciais L4) do Mosteiro de Alcobaça.



Figura 209 – Projecção ortogonal da fachada exterior Sul da Igreja do Mosteiro de Alcobaça (L5) vista no sentido Oeste-Este.

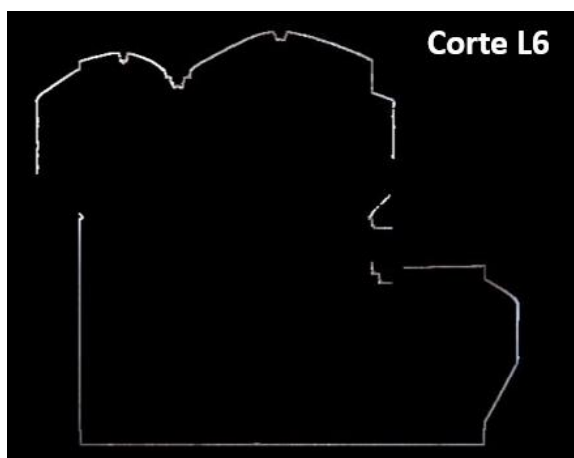


Figura 210 – Corte longitudinal no braço Norte da Igreja (L6) do Mosteiro de Alcobaça.



Figura 211 – Corte longitudinal no braço Norte da Igreja (L7) do Mosteiro de Alcobaça.

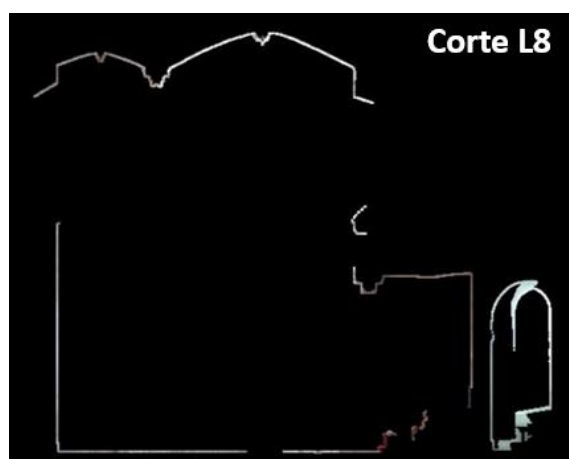


Figura 212 – Corte longitudinal no braço Sul da Igreja (L8) do Mosteiro de Alcobaça.



Figura 213 – Corte longitudinal no braço Sul da Igreja (L9) do Mosteiro de Alcobaça.

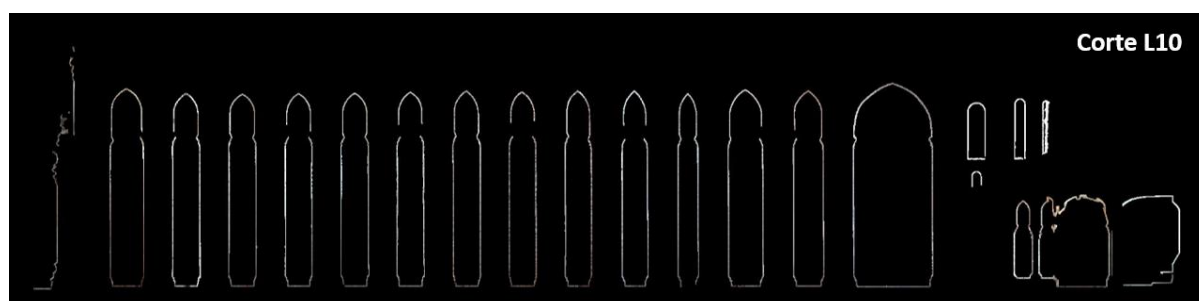


Figura 214 – Corte longitudinal que intersecta o centro dos pilares que separam as Naves Norte e Central da Igreja (L10) do Mosteiro de Alcobaça.

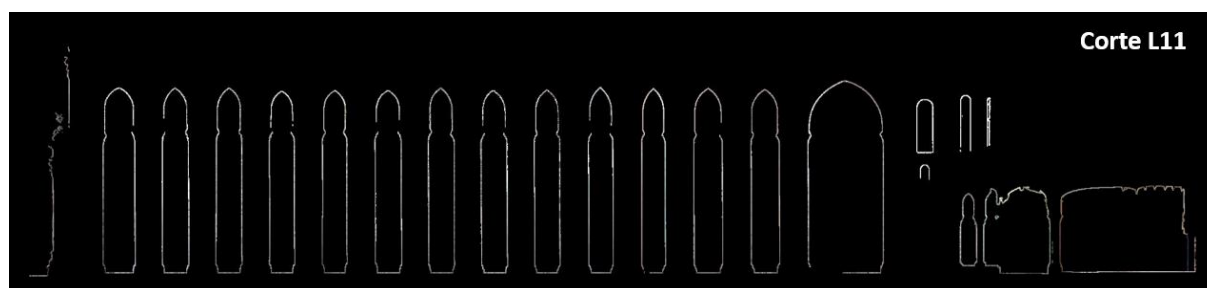


Figura 215 – Corte longitudinal que intersecta o centro dos pilares que separam as Naves Central e Sul da Igreja (L11) do Mosteiro de Alcobaça.

ANEXO G – Cortes transversais para a Igreja do Mosteiro de Alcobaça



Figura 216 – Identificação dos cortes transversais realizados para a igreja do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: Elaboração própria.

Fonte da planta: <https://arquitecturaycristianismo.files.wordpress.com/2016/08/15.jpg>.



Figura 217 – Projeção ortogonal vertical da cabeceira da Igreja do Mosteiro de Alcobaça vista no sentido Oeste-Este (T1).

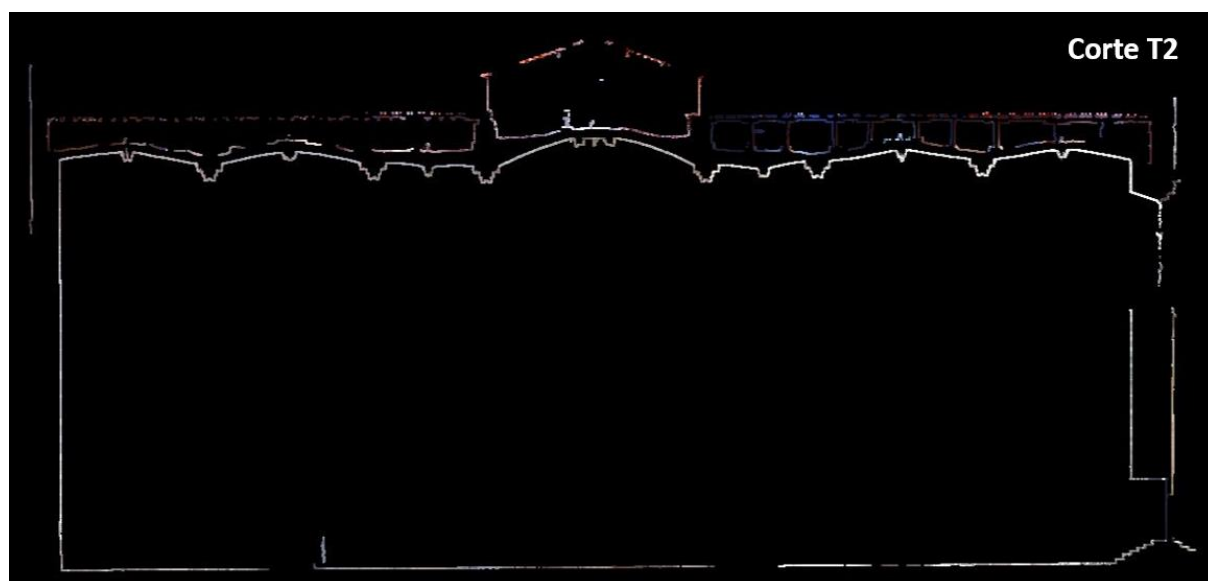


Figura 218 – Corte transversal T2 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

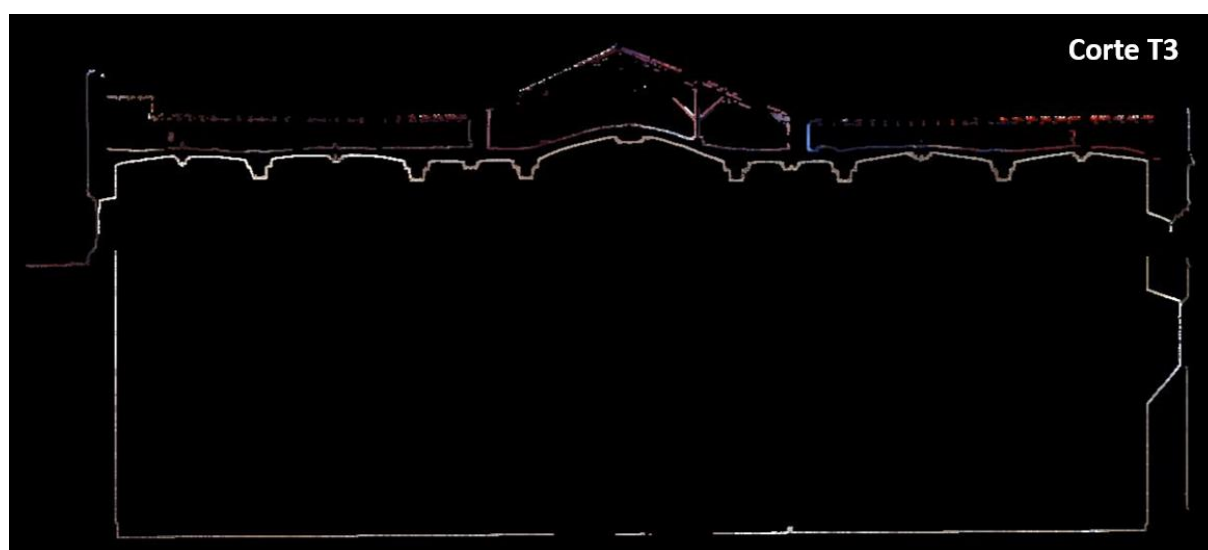


Figura 219 – Corte transversal T3 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

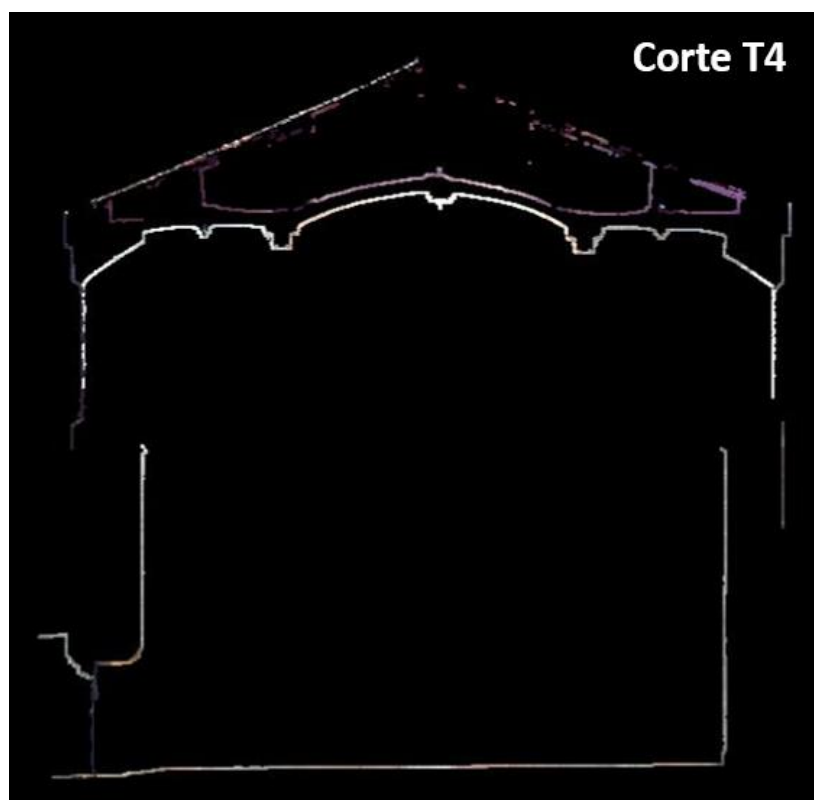


Figura 220 – Corte transversal T4 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.



Figura 221 – Corte transversal T5 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

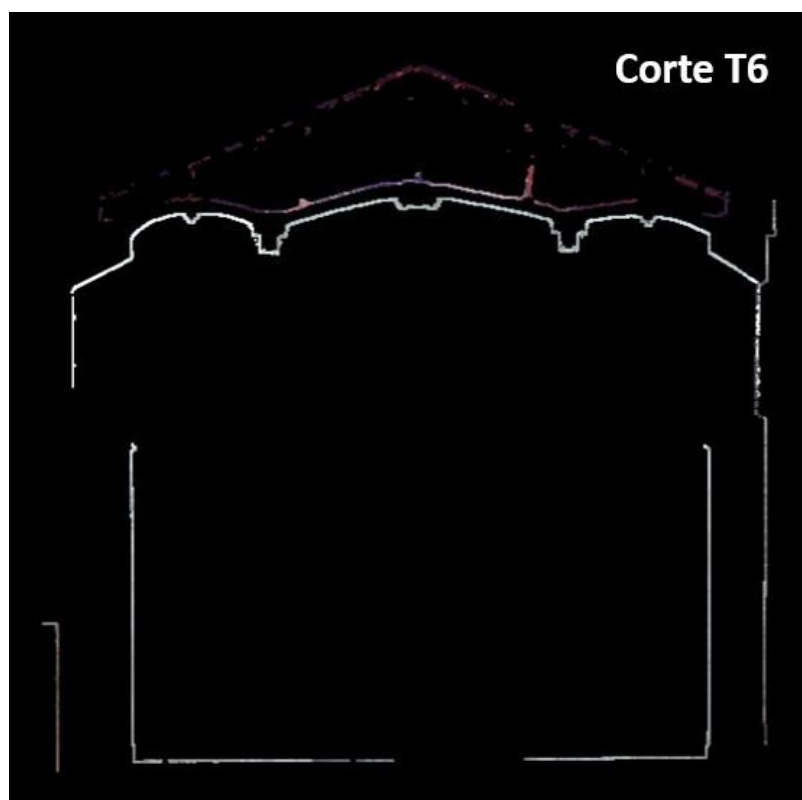


Figura 222 – Corte transversal T6 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

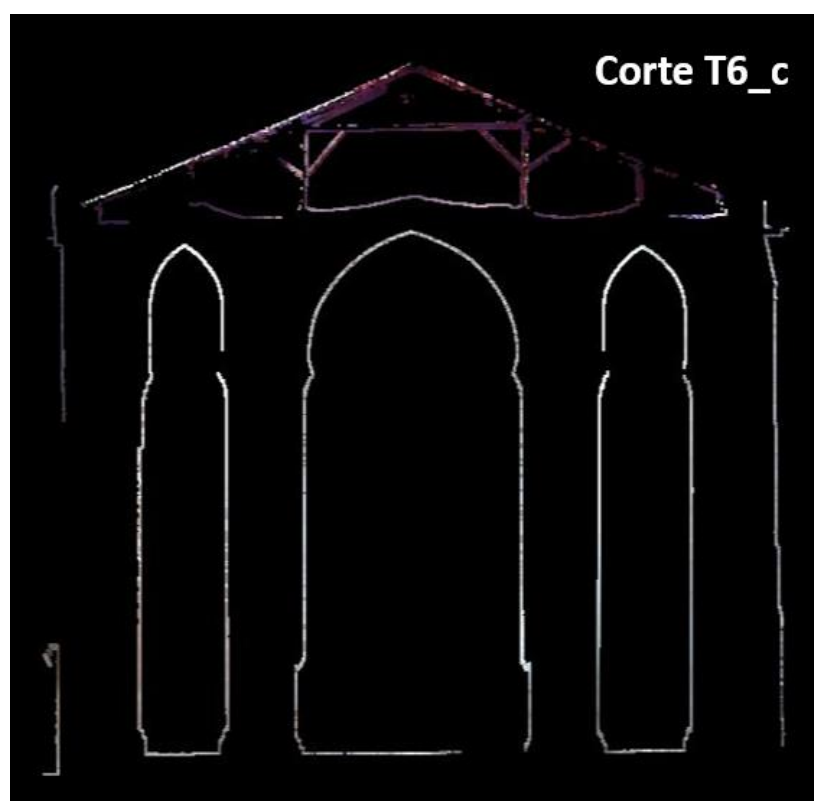


Figura 223 – Corte transversal entre pilares T6_c com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

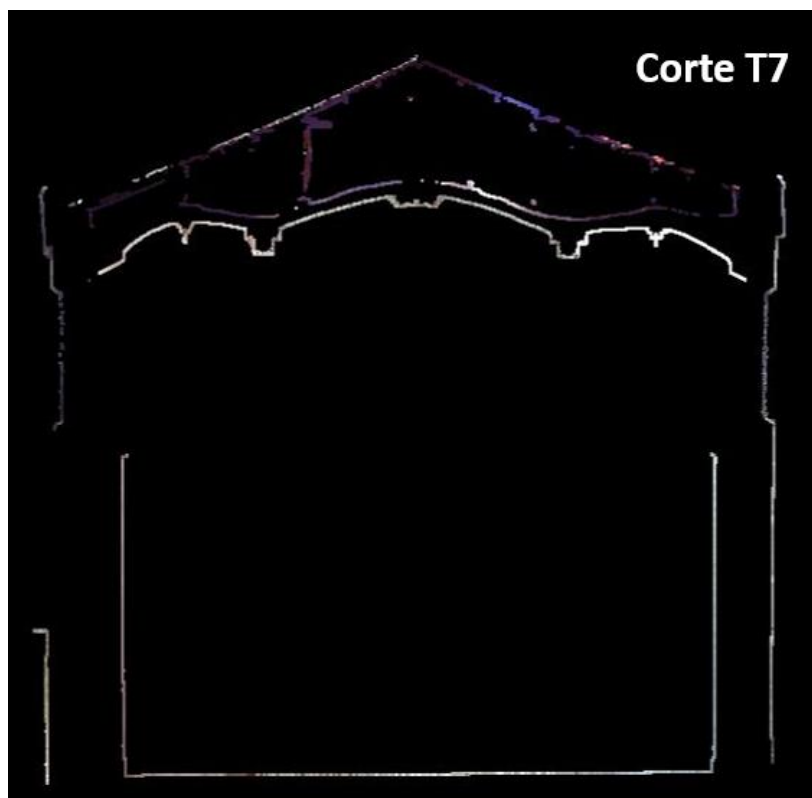


Figura 224 – Corte transversal T7 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

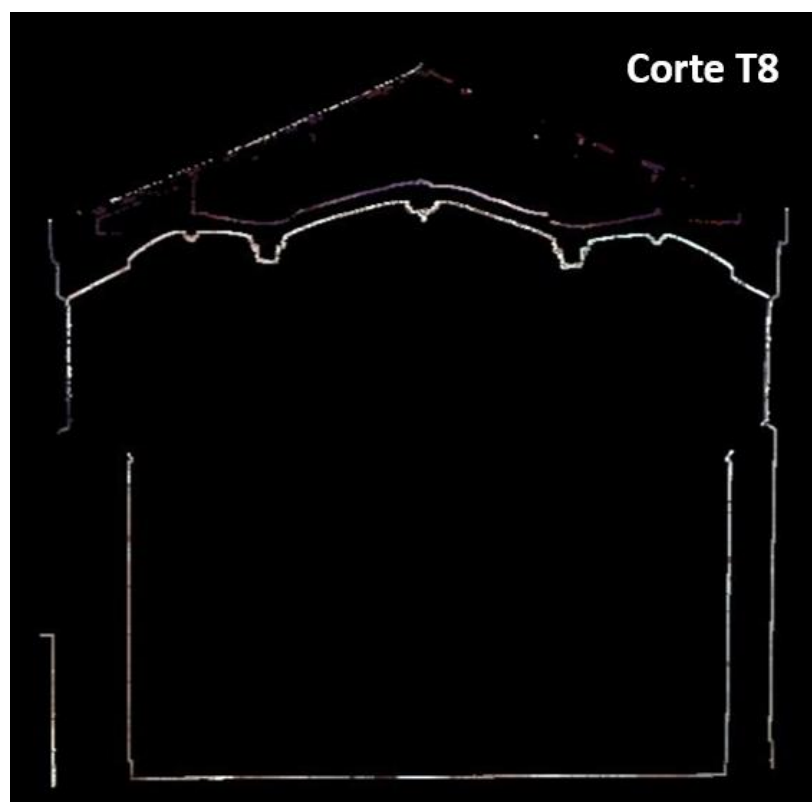


Figura 225 – Corte transversal T8 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.



Figura 226 – Corte transversal T9 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

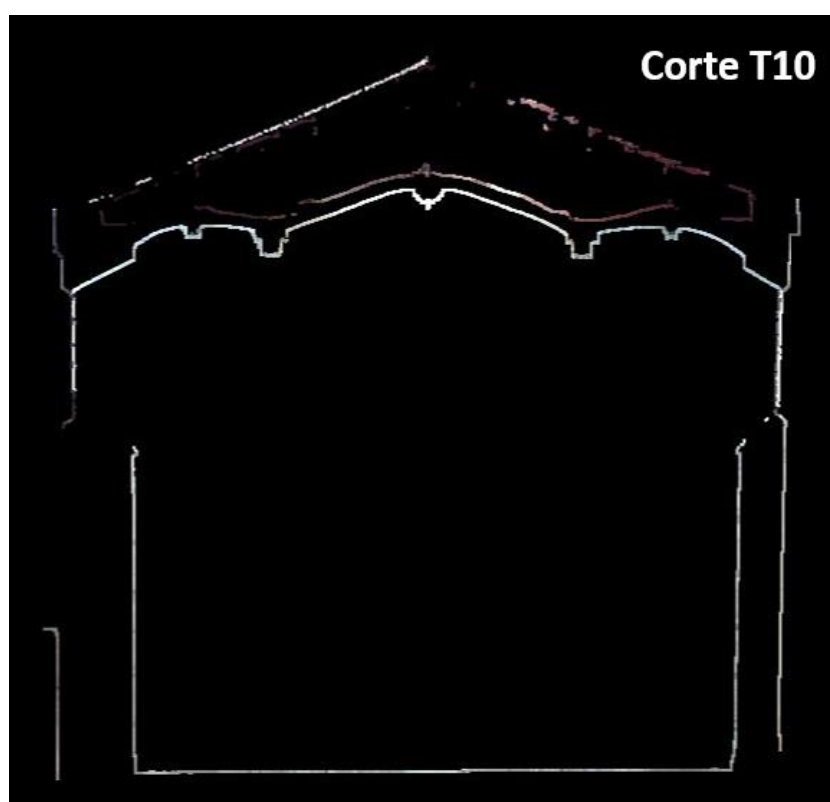


Figura 227 – Corte transversal T10 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

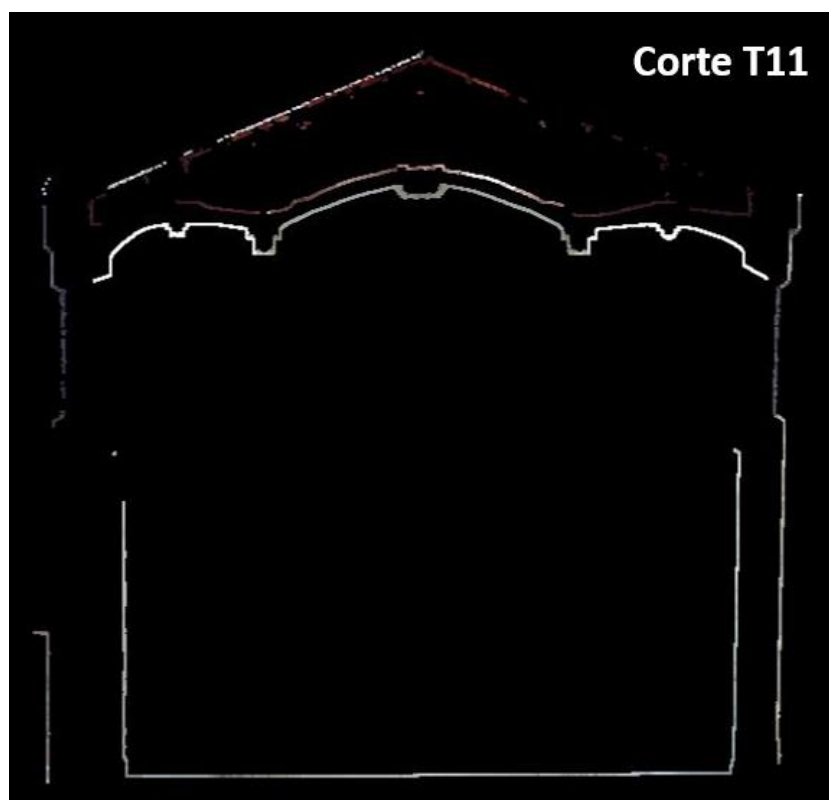


Figura 228 – Corte transversal T11 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.



Figura 229 – Corte transversal entre pilares T11_c com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

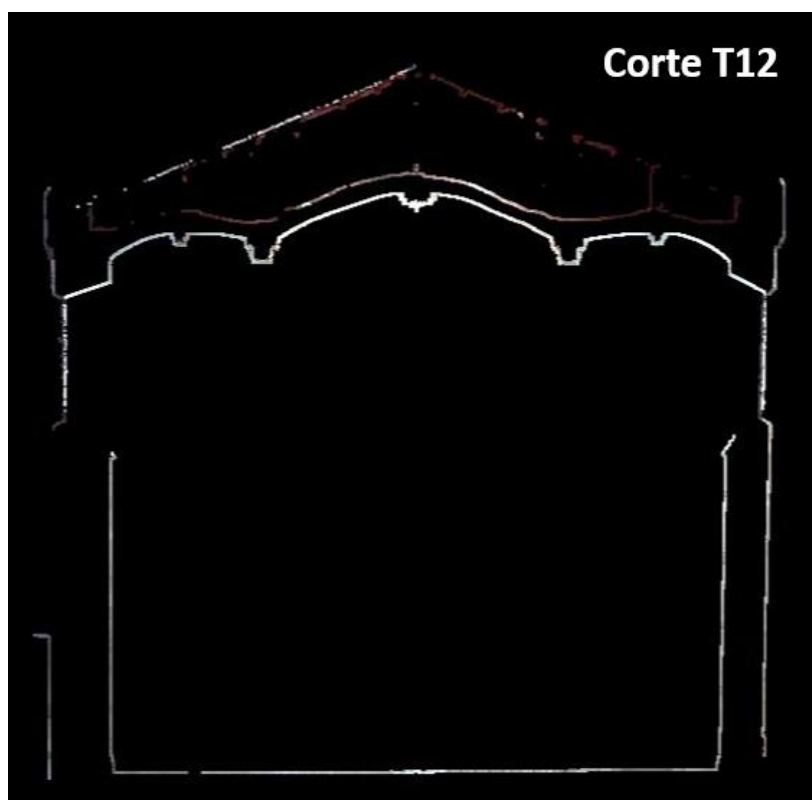


Figura 230 – Corte transversal T12 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

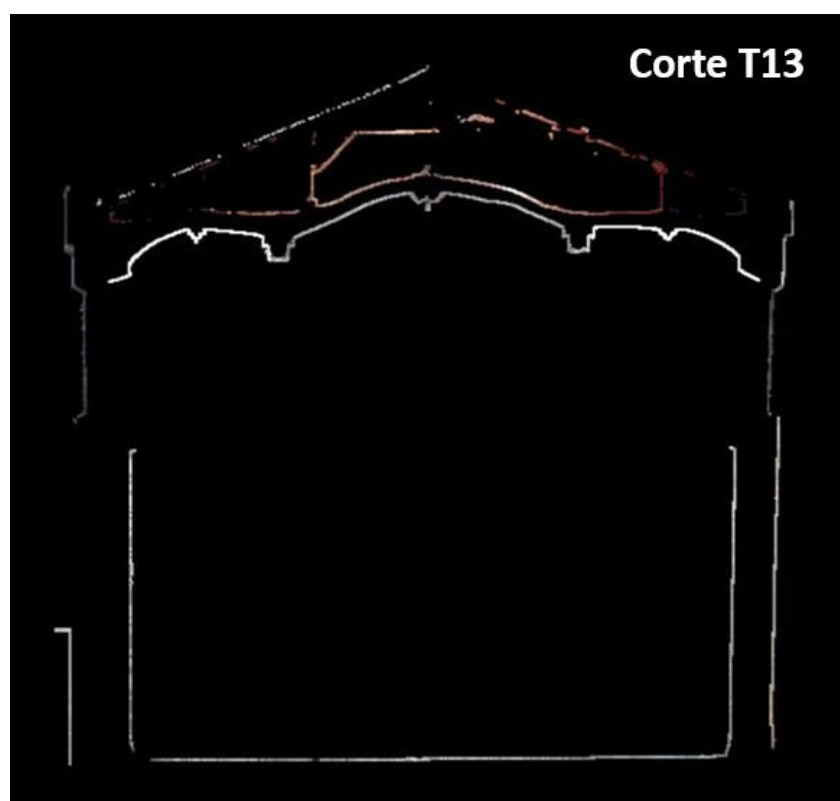


Figura 231 – Corte transversal T13 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

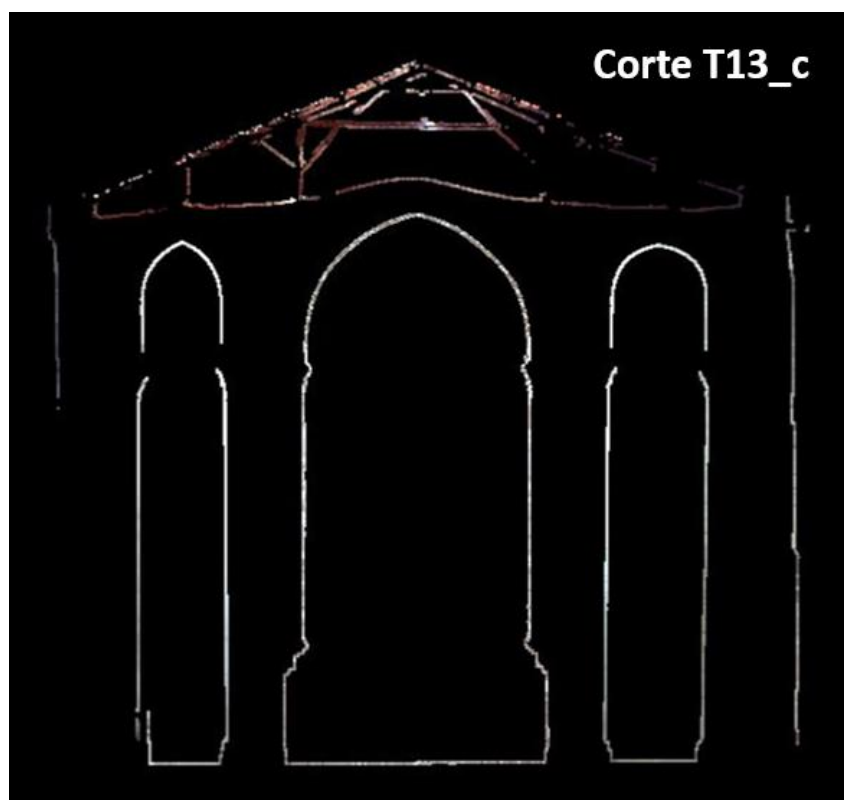


Figura 232 – Corte transversal entre pilares T13_c com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

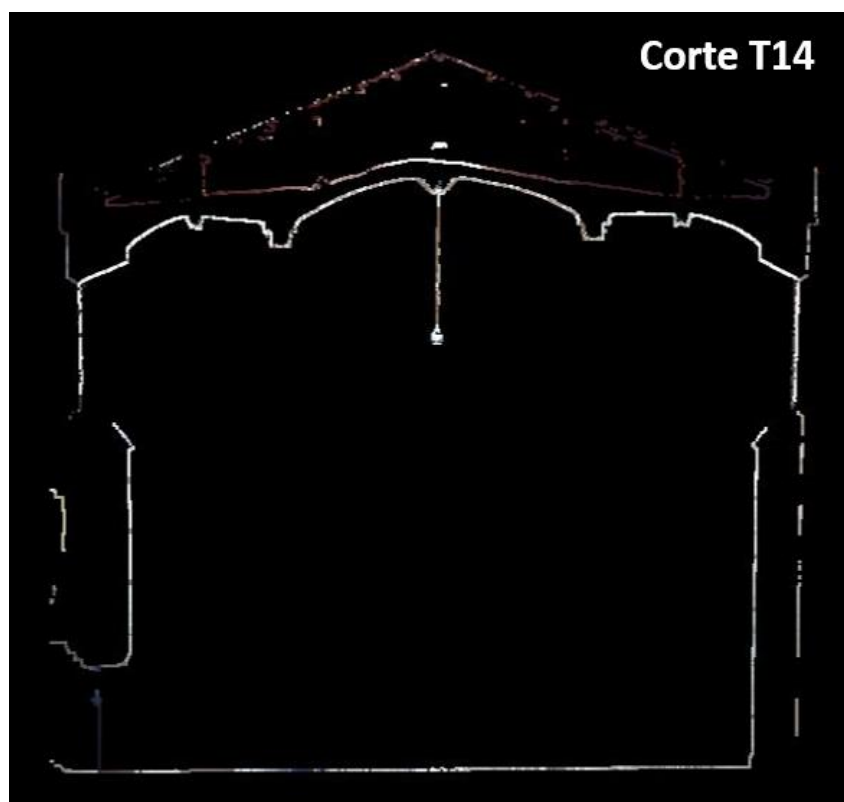


Figura 233 – Corte transversal T14 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

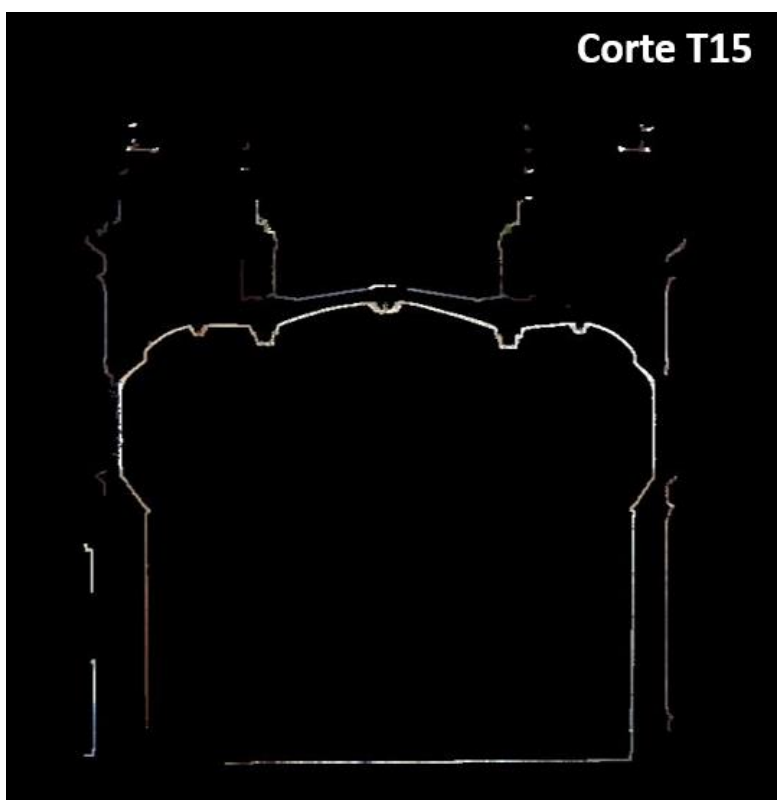


Figura 234 – Corte transversal T15 com extradorso da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

ANEXO H – Cortes em planta para a igreja do Mosteiro de Alcobaça

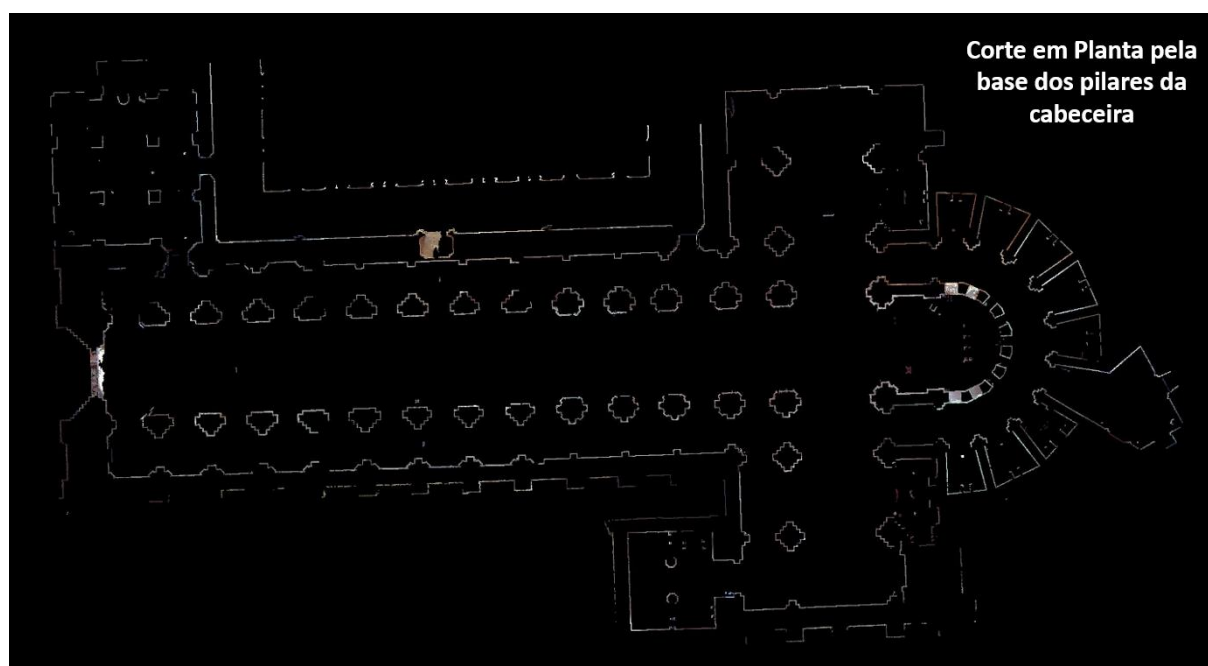


Figura 235 – Corte em planta pela base dos pilares da cabeceira da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

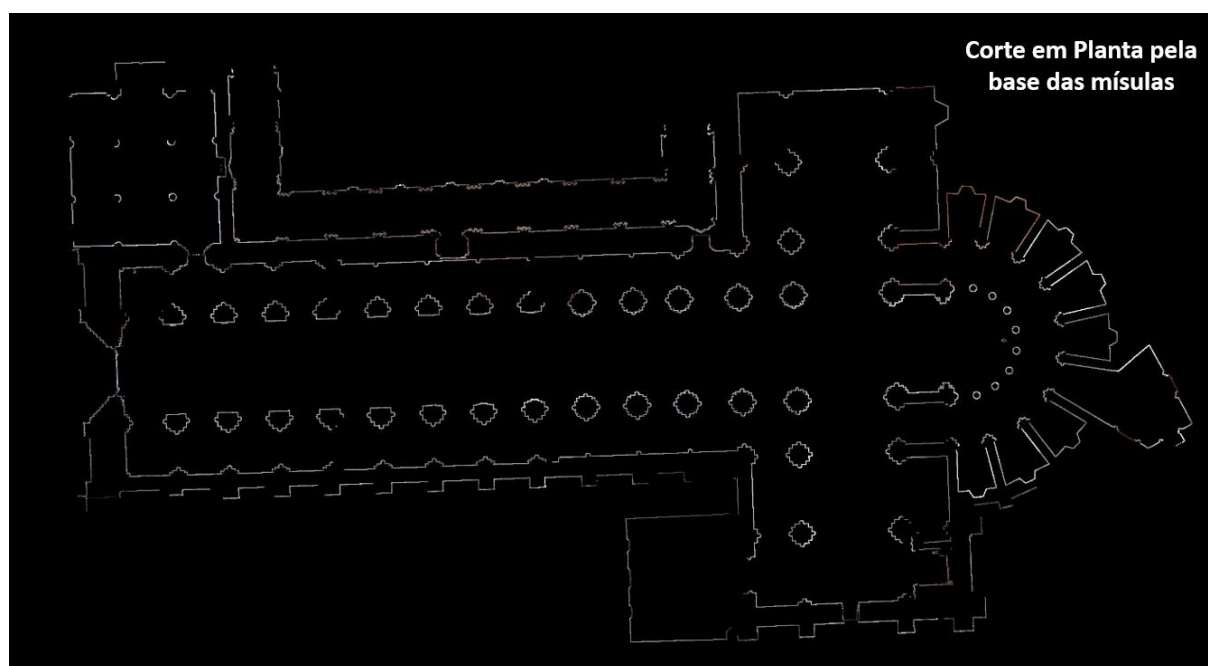


Figura 236 – Corte em planta pela base das mísulas piramidais dos pilares da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

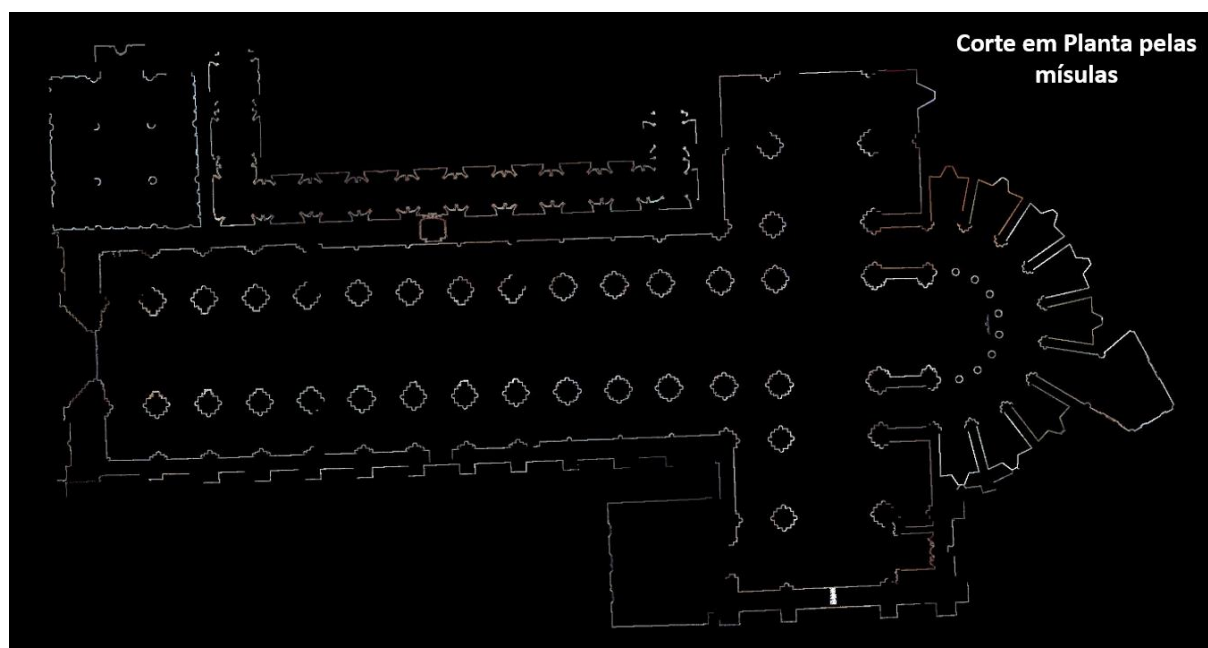


Figura 237 – Corte em planta pela altura das mísulas piramidais dos pilares da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

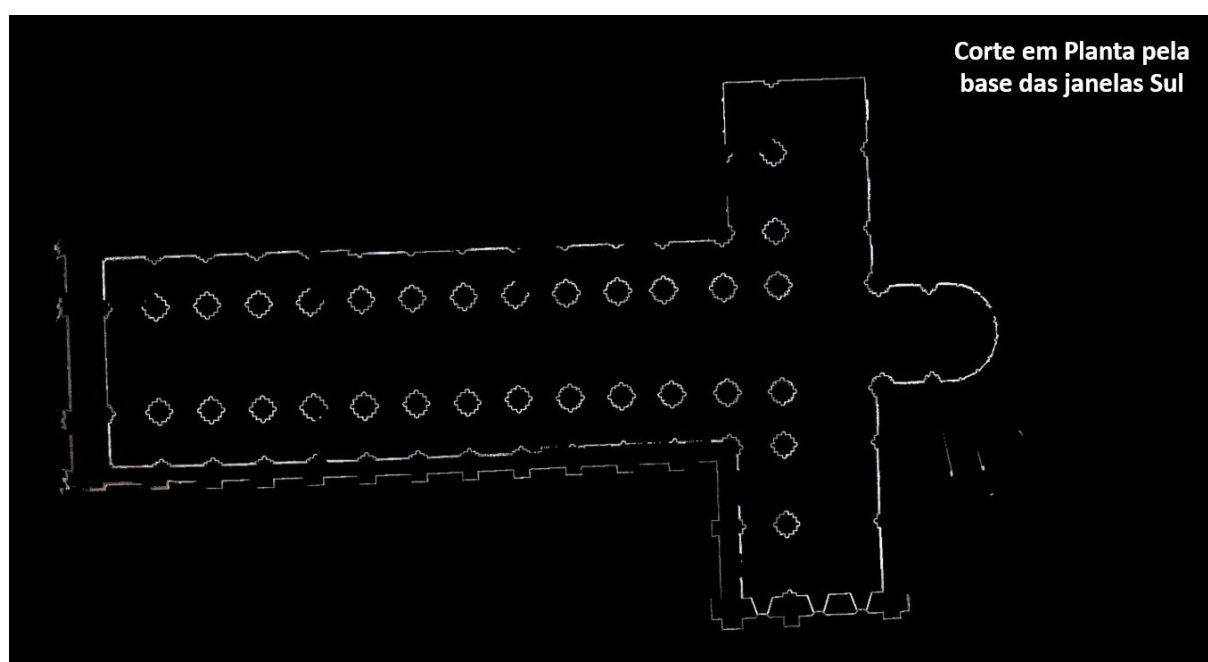


Figura 238 – Corte em planta pela base das janelas Sul da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

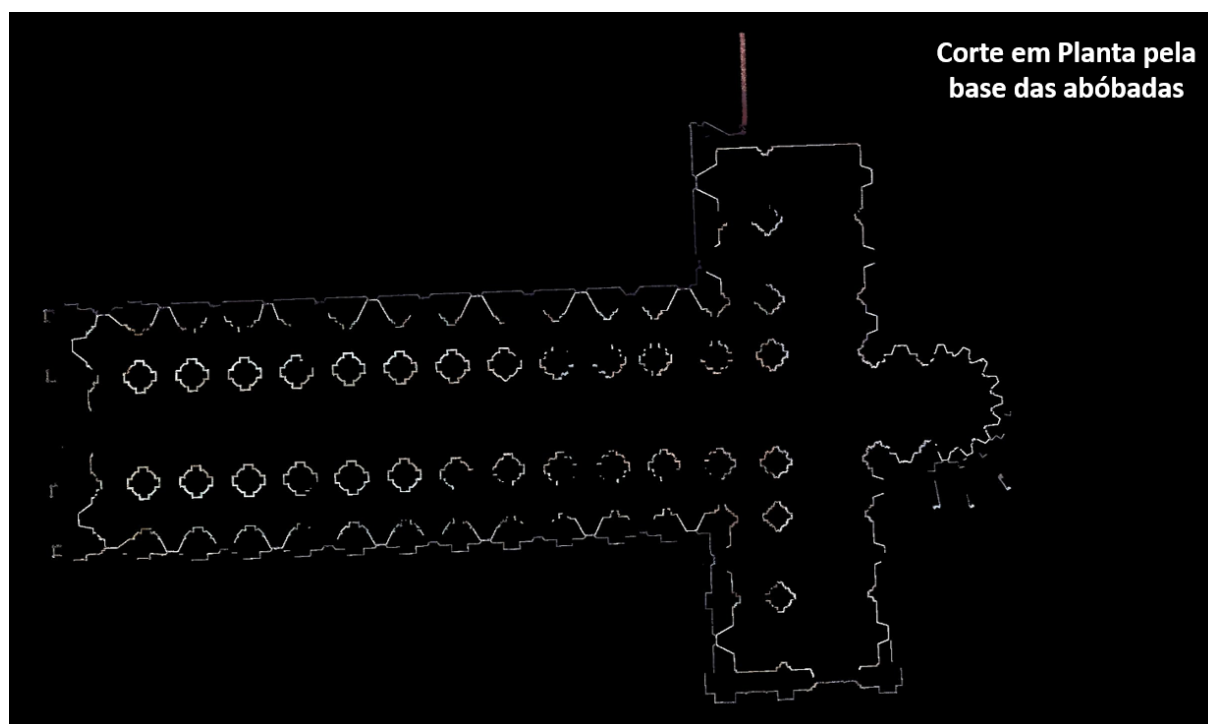


Figura 239 – Corte em planta pela base das abóbadas da Igreja do Mosteiro de Alcobaça.

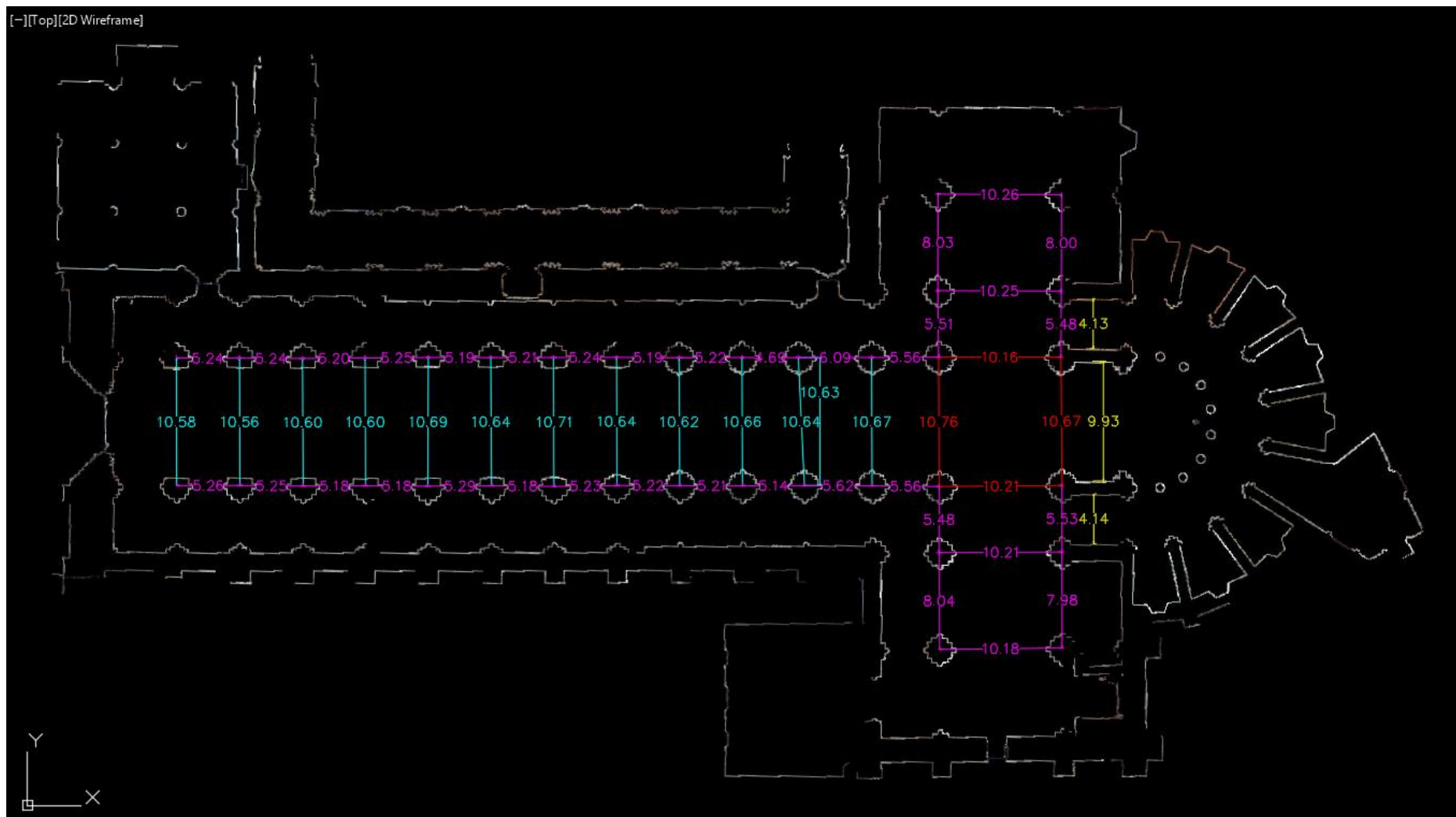


Figura 240 – Medições realizadas sobre a orto-imagem do corte em planta (pela base das mísulas) da Igreja do Mosteiro de Alcobaça (1).

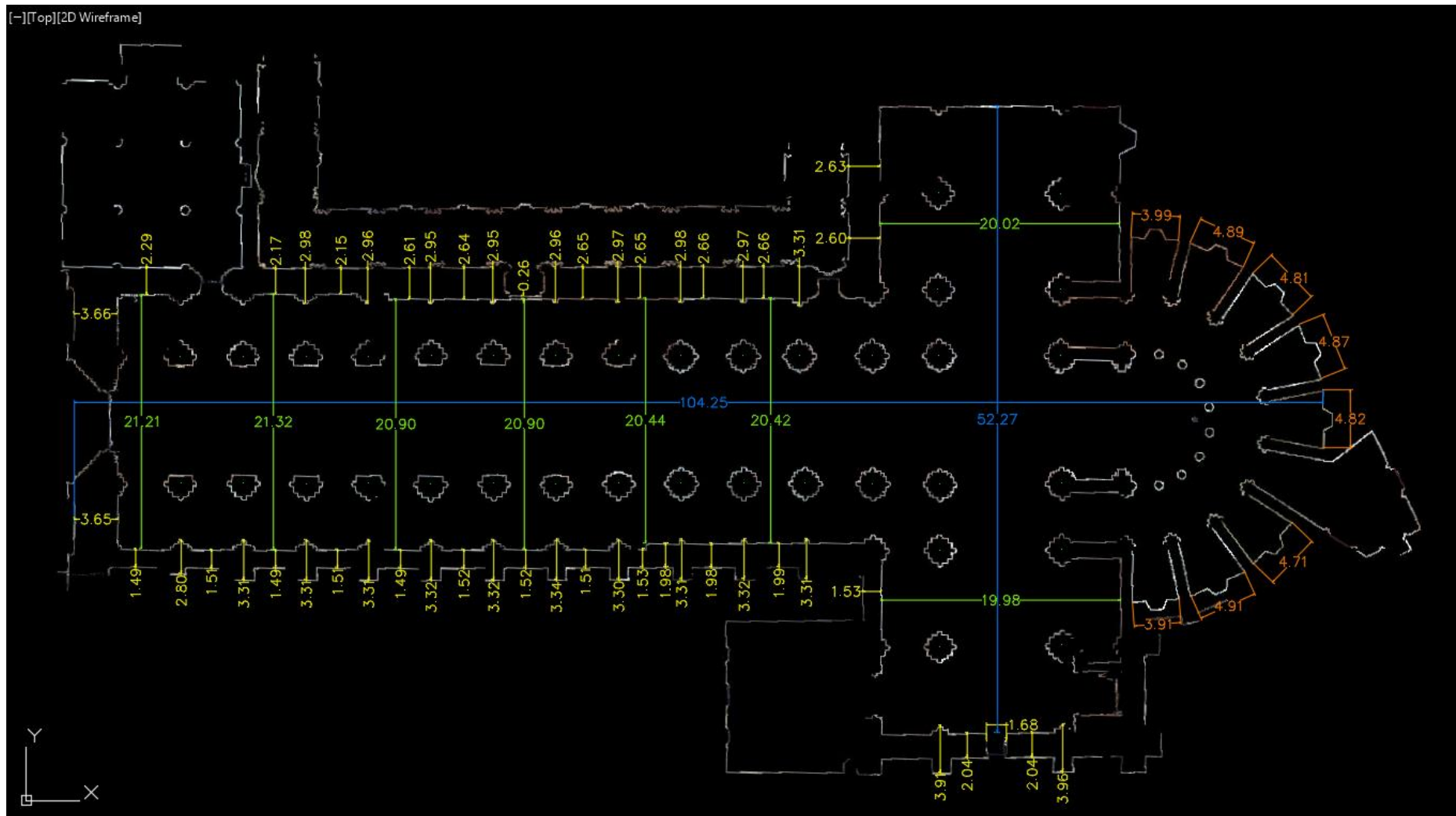


Figura 241 – Medições realizadas sobre a orto-imagem do corte em planta (pela base das mísulas) da Igreja do Mosteiro de Alcobaça (2).

ANEXO I – Cortes longitudinais e transversais da Sacristia Nova e da Capela Relicário

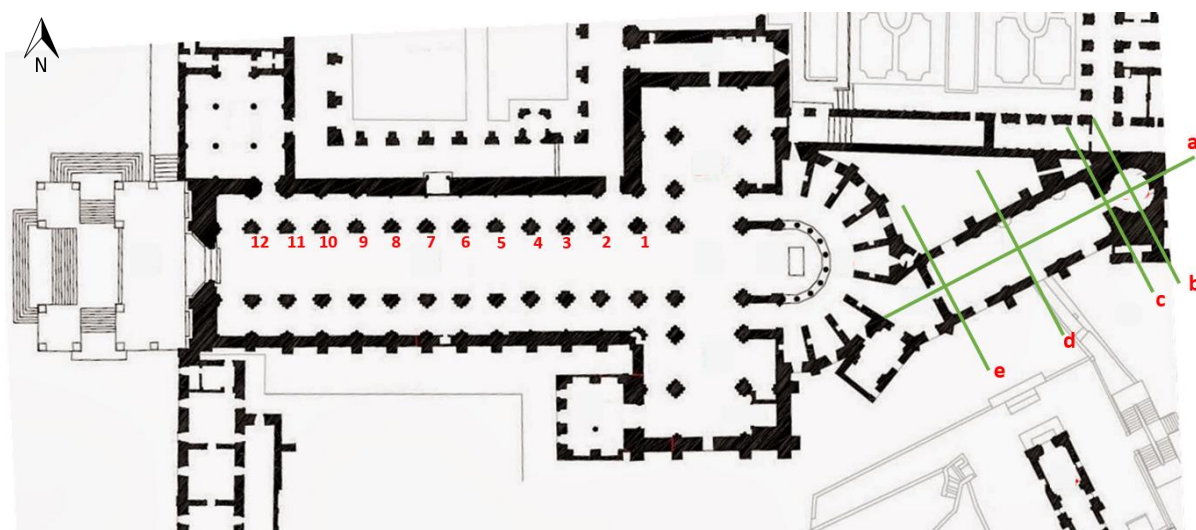


Figura 242 – Identificação dos cortes realizados para a Sacristia Nova e Capela Relicário do Mosteiro de Alcobaça.

Fonte: Elaboração própria.

Fonte da planta: <https://arquitecturaycristianismo.files.wordpress.com/2016/08/15.jpg>.

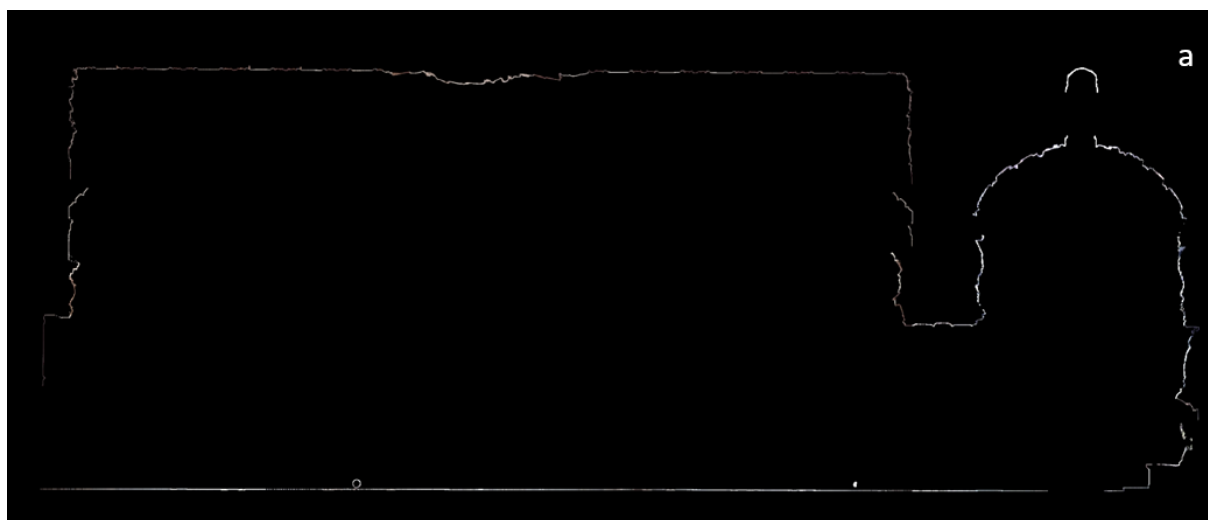


Figura 243 – Corte longitudinal (a) obtido para a Sacristia Nova e Capela Relicário do Mosteiro de Alcobaça.

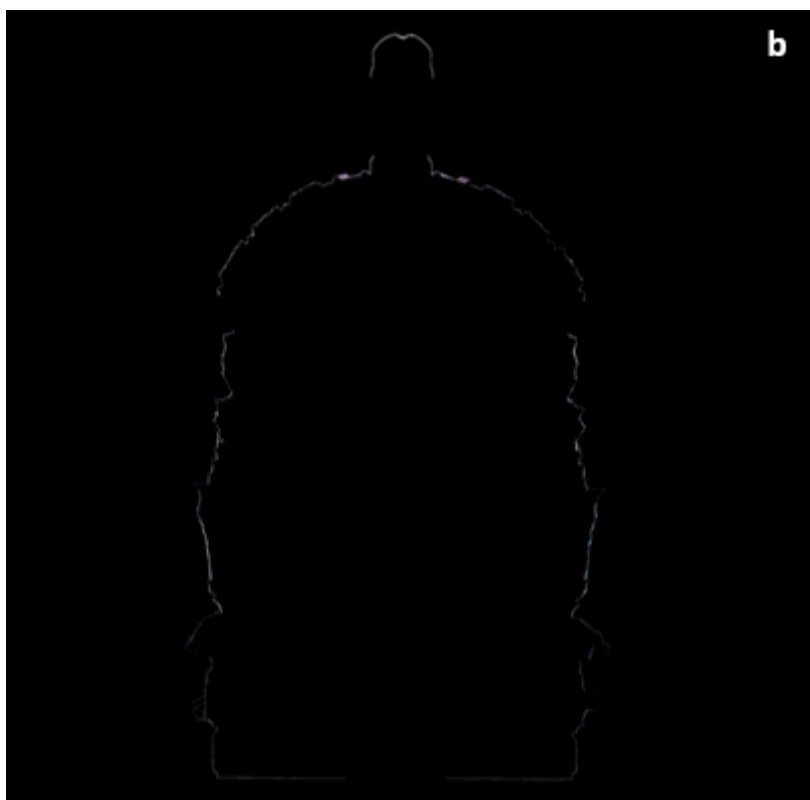


Figura 244 – Corte transversal (b) obtido para a Capela Relicário do Mosteiro de Alcobaça.

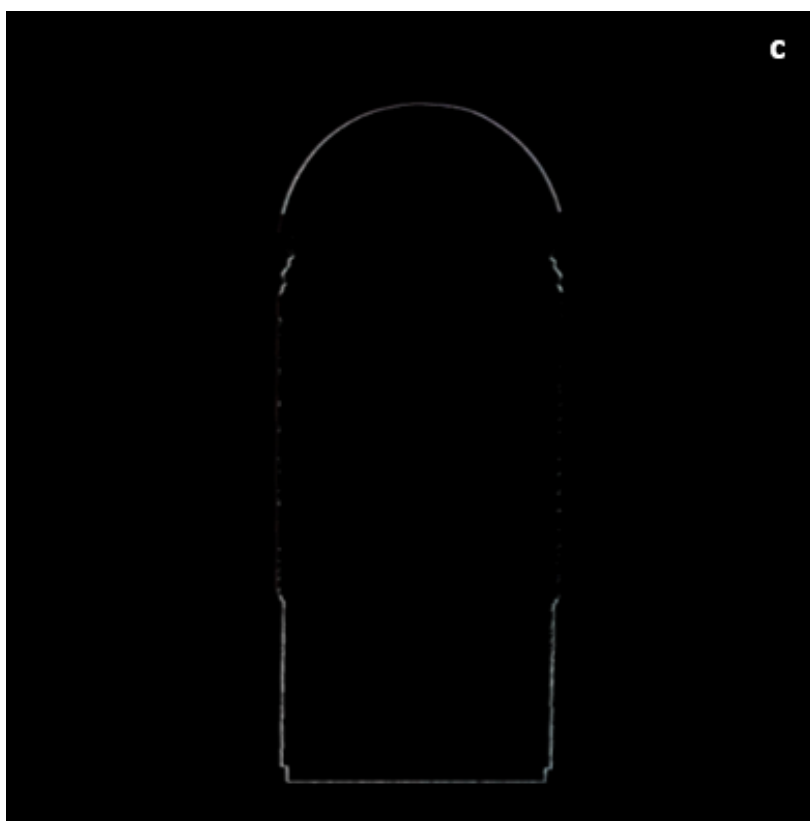


Figura 245 – Corte transversal (c) obtido para a Sacristia Nova e Capela Relicário do Mosteiro de Alcobaça.



Figura 246 – Corte transversal (d) obtido para a Sacristia Nova do Mosteiro de Alcobaça.



Figura 247 – Corte transversal (e) obtido para a Sacristia Nova do Mosteiro de Alcobaça.

ANEXO J – Modelos 3D dos Túmulos de D. Pedro I e D. Inês de Castro

Modelo 3D do Túmulo de D. Pedro I

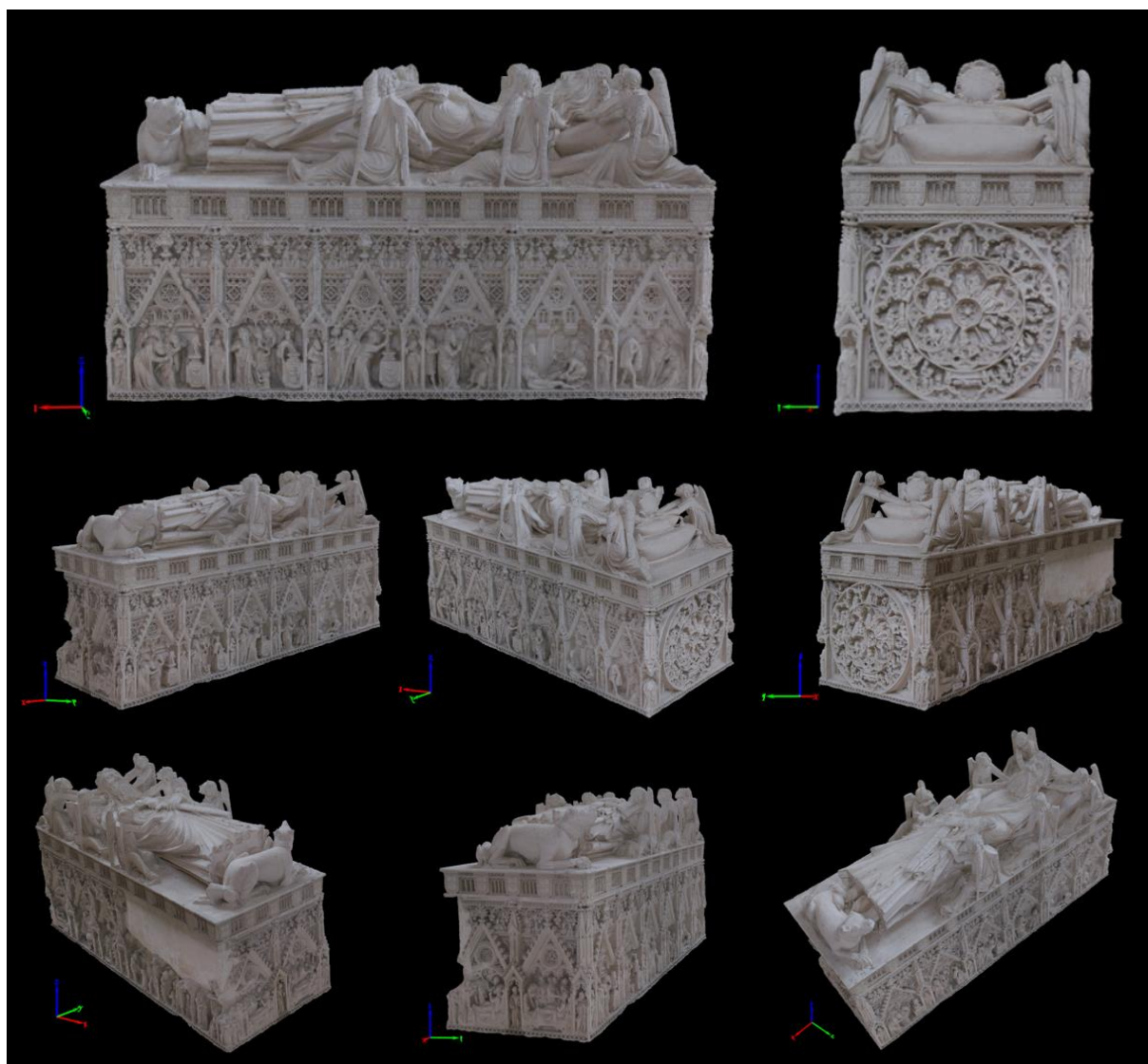


Figura 248 – Modelo 3D gerado para o túmulo de D. Pedro I sob diferentes perspectivas.

Modelo 3D do Túmulo de D. Inês de Castro

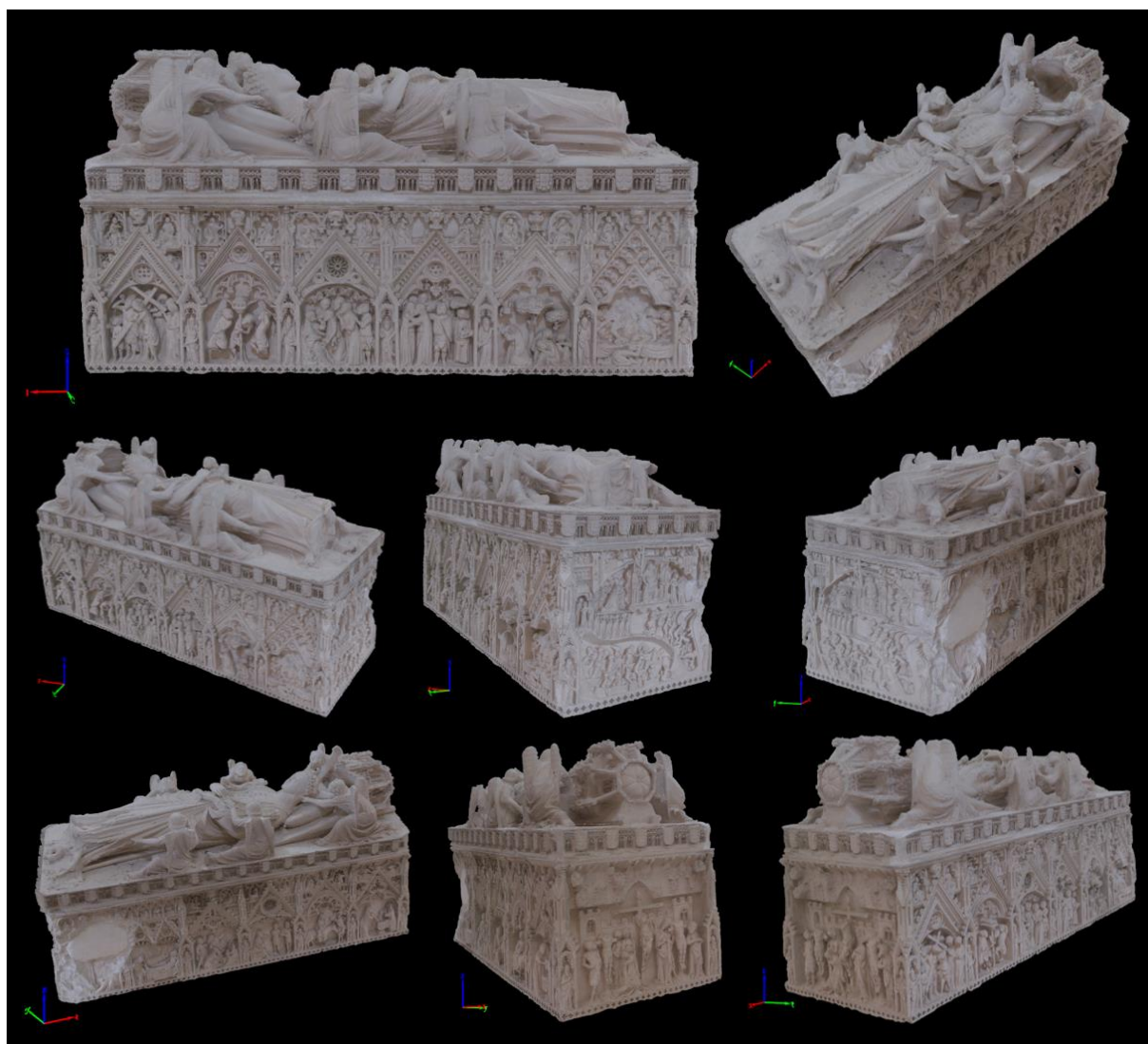


Figura 249 – Modelo 3D gerado para o túmulo de D. Inês de Castro sob diferentes perspectivas.

ANEXO K – Relatórios de Qualidade da Restituição Múltipla Automática realizada para os túmulos D. Pedro I e D. Inês de Castro no *software Pix4D*

Relatório de Qualidade – Túmulo de D. Pedro I

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper Pro version 4.2.27

**Important:** Click on the different icons for:

Help to analyze the results in the Quality Report



Additional information about the sections

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	Tumulo_Pedrol_24Maio16&25Junho18_todas
Processed	2018-07-18 17:05:58
Camera Model Name(s)	DSLR-A230_18.0_3872x2176 (RGB), DSLR-A230_24.0_3872x2176 (RGB), DSLR-A230_22.0_3872x2176 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	undefined
Time for Initial Processing (without report)	01h:05m:57s

Quality Check



Images	median of 3082 keypoints per image	
Dataset	777 out of 810 images calibrated (95%), all images enabled	
Camera Optimization	2.8% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 1896.63 matches per calibrated image	
Georeferencing	no, no 3D GCP	

Calibration Details



Number of Calibrated Images	777 out of 810
Number of Geolocated Images	0 out of 810



Initial Image Positions



The preview is not generated for images without geolocation.



Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



The preview is not generated for images without geolocation.

Bundle Block Adjustment Details



Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	1408431
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	418131
Mean Reprojection Error [pixels]	0.109

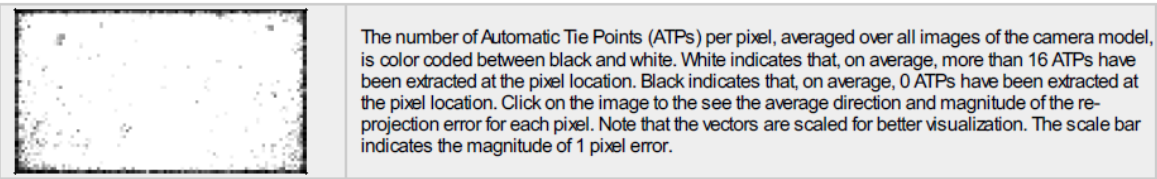
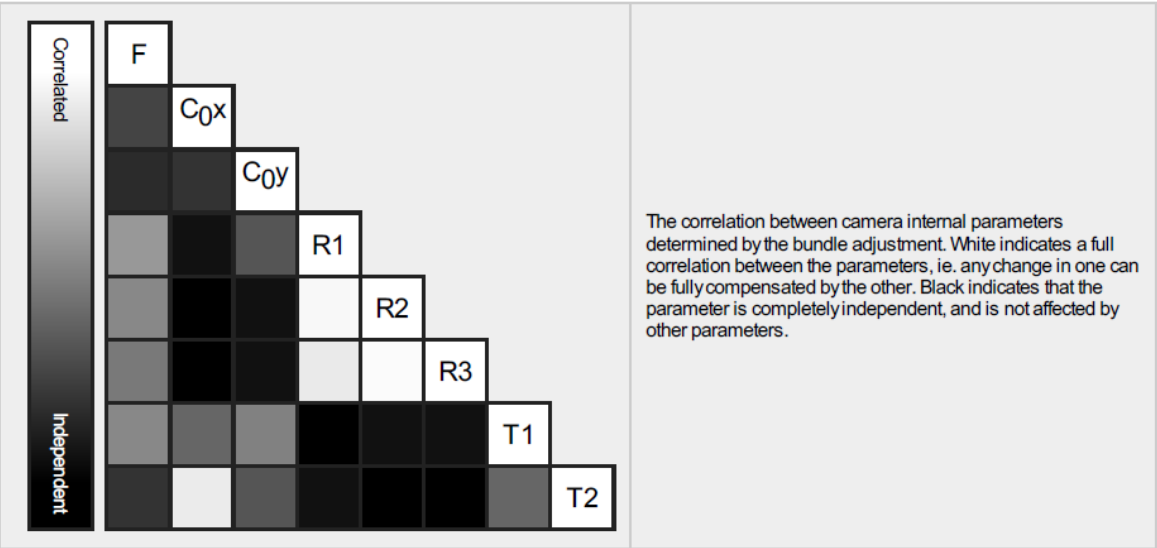
Internal Camera Parameters

DSLR-A230_18.0_3872x2176 (RGB). Sensor Dimensions: 23.333 [mm] x 13.113 [mm]



EXIF ID: DSLR-A230_18.0_3872x2176

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	2986.971 [pixel] 18.000 [mm]	1936.000 [pixel] 11.667 [mm]	1088.000 [pixel] 6.556 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	3023.677 [pixel] 18.221 [mm]	1937.294 [pixel] 11.674 [mm]	1074.396 [pixel] 6.474 [mm]	-0.088	0.018	0.002	0.000	0.000
Uncertainties (Sigma)	0.281 [pixel] 0.002 [mm]	0.526 [pixel] 0.003 [mm]	0.356 [pixel] 0.002 [mm]	0.001	0.003	0.004	0.000	0.000



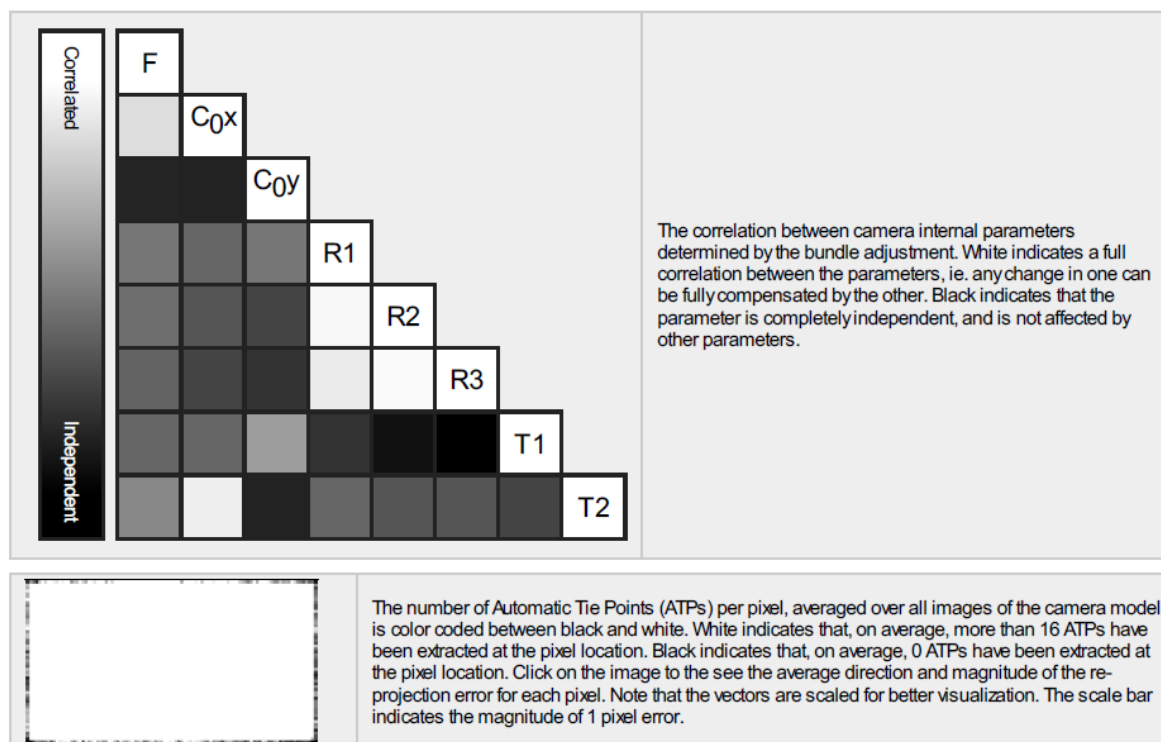
Internal Camera Parameters

DSLR-A230_24.0_3872x2176 (RGB). Sensor Dimensions: 23.333 [mm] x 13.113 [mm]



EXIF ID: DSLR-A230_24.0_3872x2176

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3982.628 [pixel] 24.000 [mm]	1936.000 [pixel] 11.667 [mm]	1088.000 [pixel] 6.556 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	3821.603 [pixel] 23.030 [mm]	1933.906 [pixel] 11.654 [mm]	1078.391 [pixel] 6.499 [mm]	-0.059	0.008	-0.020	0.000	-0.000
Uncertainties (Sigma)	0.318 [pixel] 0.002 [mm]	0.673 [pixel] 0.004 [mm]	0.494 [pixel] 0.003 [mm]	0.001	0.007	0.013	0.000	0.000



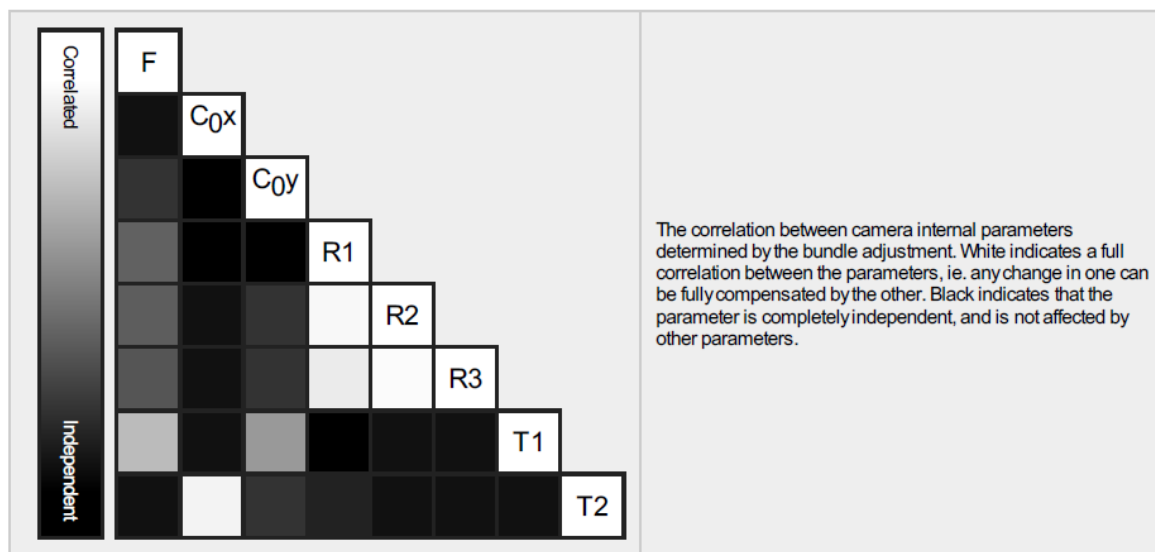
? Internal Camera Parameters

DSLR-A230_22.0_3872x2176 (RGB). Sensor Dimensions: 23.333 [mm] x 13.113 [mm]



EXIF ID: DSLR-A230_22.0_3872x2176

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3650.743 [pixel] 22.000 [mm]	1936.000 [pixel] 11.667 [mm]	1088.000 [pixel] 6.556 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	3764.993 [pixel] 22.688 [mm]	1941.035 [pixel] 11.697 [mm]	1083.785 [pixel] 6.531 [mm]	-0.062	0.001	0.006	0.000	0.000
Uncertainties (Sigma)	0.258 [pixel] 0.002 [mm]	0.610 [pixel] 0.004 [mm]	0.385 [pixel] 0.002 [mm]	0.001	0.005	0.009	0.000	0.000





The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the re-projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization. The scale bar indicates the magnitude of 1 pixel error.

? 2D Keypoints Table



	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	3082	1897
Min	2520	96
Max	4364	3096
Mean	3174	1813

2D Keypoints Table for Camera DSLR-A230_18.0_3872x2176 (RGB)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	3165	1353
Min	2604	96
Max	4236	2457
Mean	3200	1299

2D Keypoints Table for Camera DSLR-A230_24.0_3872x2176 (RGB)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	3441	2050
Min	2771	1365
Max	4364	3096
Mean	3461	2086

2D Keypoints Table for Camera DSLR-A230_22.0_3872x2176 (RGB)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	2920	1921
Min	2520	1290
Max	3359	2429
Mean	2942	1936

Median / 75% / Maximal Number of Matches Between Camera Models

	DSLR-A230_18.0_... (RGB)	DSLR-A230_24.0_... (RGB)	DSLR-A230_22.0_... (RGB)
DSLR-A230_18.0_3872x2176 (RGB)	13 / 61 / 1891	9 / 32 / 474	3 / 9 / 182
DSLR-A230_24.0_3872x2176 (RGB)		25 / 128 / 2102	3 / 10 / 378
DSLR-A230_22.0_3872x2176 (RGB)			21 / 90 / 1640

? 3D Points from 2D Keypoint Matches



	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	239463
In 3 Images	72638
In 4 Images	36313
In 5 Images	21033
In 6 Images	13898
In 7 Images	9103
In 8 Images	6419
In 9 Images	4387
In 10 Images	3152
In 11 Images	2281

In 12 Images	1688
In 13 Images	1323
In 14 Images	1099
In 15 Images	835
In 16 Images	685
In 17 Images	570
In 18 Images	459
In 19 Images	383
In 20 Images	320
In 21 Images	246
In 22 Images	260
In 23 Images	204
In 24 Images	162
In 25 Images	133
In 26 Images	133
In 27 Images	125
In 28 Images	95
In 29 Images	104
In 30 Images	75
In 31 Images	53
In 32 Images	59
In 33 Images	47
In 34 Images	52
In 35 Images	37
In 36 Images	32
In 37 Images	31
In 38 Images	30
In 39 Images	26
In 40 Images	18
In 41 Images	17
In 42 Images	23
In 43 Images	19
In 44 Images	7
In 45 Images	7
In 46 Images	8
In 47 Images	13
In 48 Images	4
In 49 Images	7
In 50 Images	5
In 51 Images	4
In 52 Images	8
In 53 Images	4
In 54 Images	4
In 55 Images	2
In 56 Images	2
In 58 Images	6
In 59 Images	4
In 60 Images	1
In 61 Images	2
In 63 Images	2
In 64 Images	2
In 66 Images	2
In 68 Images	1
In 70 Images	3
In 73 Images	1
In 74 Images	1
In 82 Images	1

2D Keypoint Matches

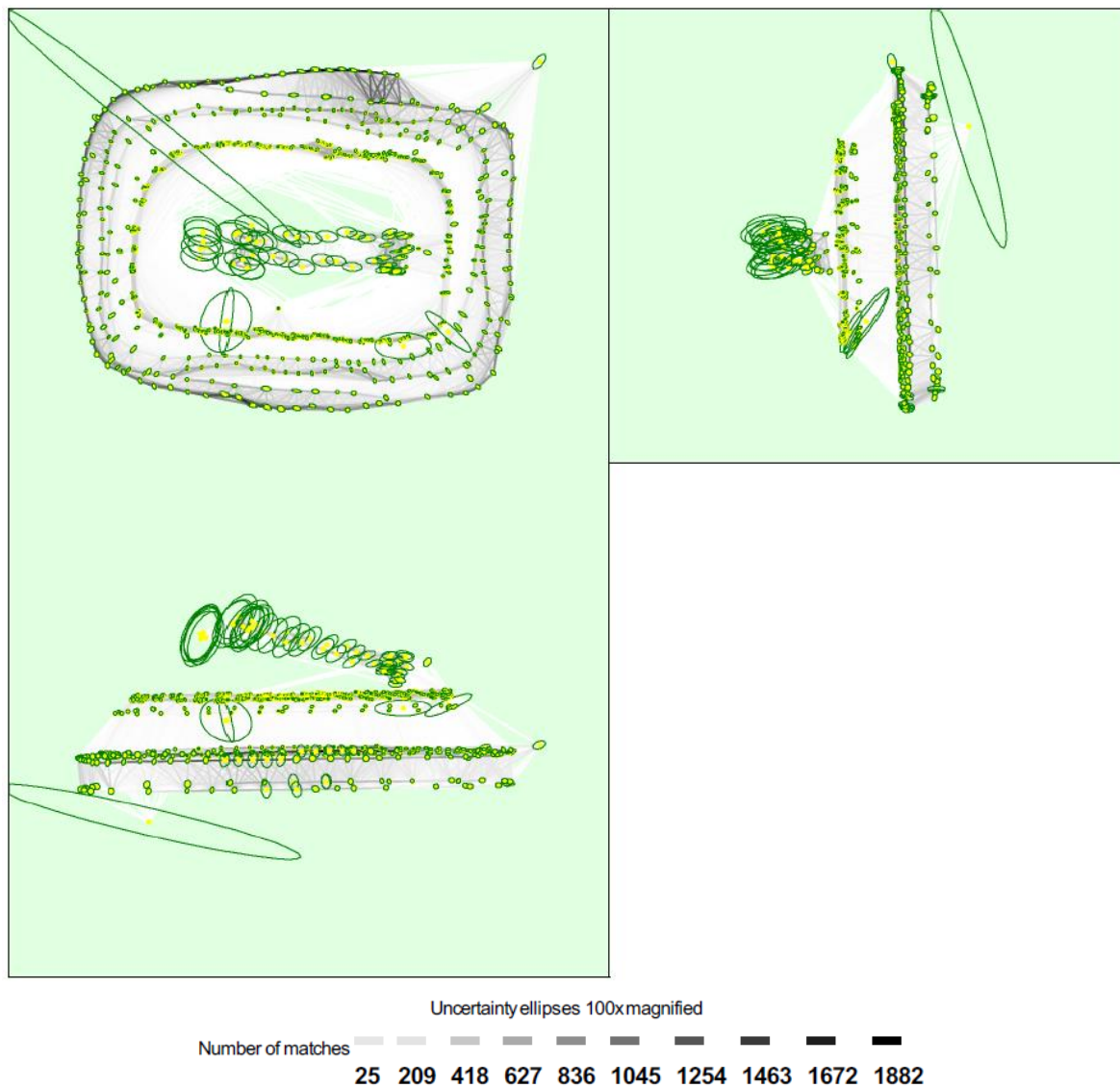


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.018	0.015	0.016	0.020	0.015	0.016
Sigma	0.039	0.031	0.025	0.021	0.017	0.017

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-6700 CPU @ 3.40GHz RAM: 64GB GPU: NVIDIA GeForce GTX 1060 3GB (Driver: 23.21.13.8813)
Operating System	Windows 10 Education N, 64-bit

Coordinate Systems

Output Coordinate System	Arbitrary (m)
--------------------------	---------------

Processing Options

Detected Template	3D Models - Rapid/Low Res
Keypoints Image Scale	Rapid, Image Scale: 0.25
Advanced: Matching Image Pairs	Free Flight or Terrestrial
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details**Processing Options**

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	no
LOD	Generated: no
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	03h:30m:33s
Time for Point Cloud Classification	NA
Time for 3D Textured Mesh Generation	NA

Results

Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	17717639
Average Density (per m ³)	34.98

Relatório de Qualidade – Túmulo de D. Inês de Castro

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper Pro version 4.2.27

**Important:** Click on the different icons for:

Help to analyze the results in the Quality Report



Additional information about the sections

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	Tumulo_Ines_25Junho18_sem_estatuas_FINAL
Processed	2018-07-11 16:56:11
Camera Model Name(s)	DSLR-A230_55.0_3872x2176 (RGB), DSLR-A230_18.0_3872x2176 (RGB), DSLR-A230_24.0_3872x2176 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	undefined

Quality Check



Images	median of 3144 keypoints per image	
Dataset	1186 out of 1187 images calibrated (99%), all images enabled	
Camera Optimization	2.05% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 1971.55 matches per calibrated image	
Georeferencing	no, no 3D GCP	

Calibration Details



Number of Calibrated Images	1186 out of 1187
Number of Geolocated Images	0 out of 1187

Initial Image Positions



The preview is not generated for images without geolocation.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



The preview is not generated for images without geolocation.

Bundle Block Adjustment Details



Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	2291841
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	551401
Mean Reprojection Error [pixels]	0.117

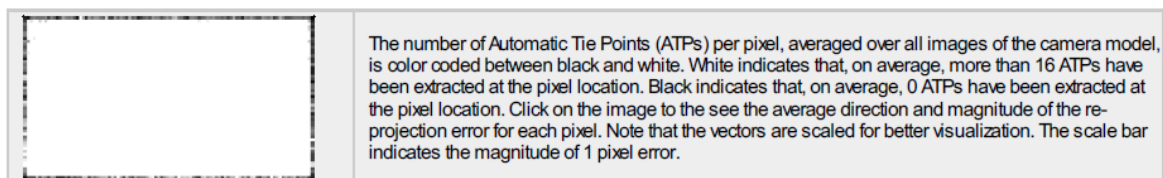
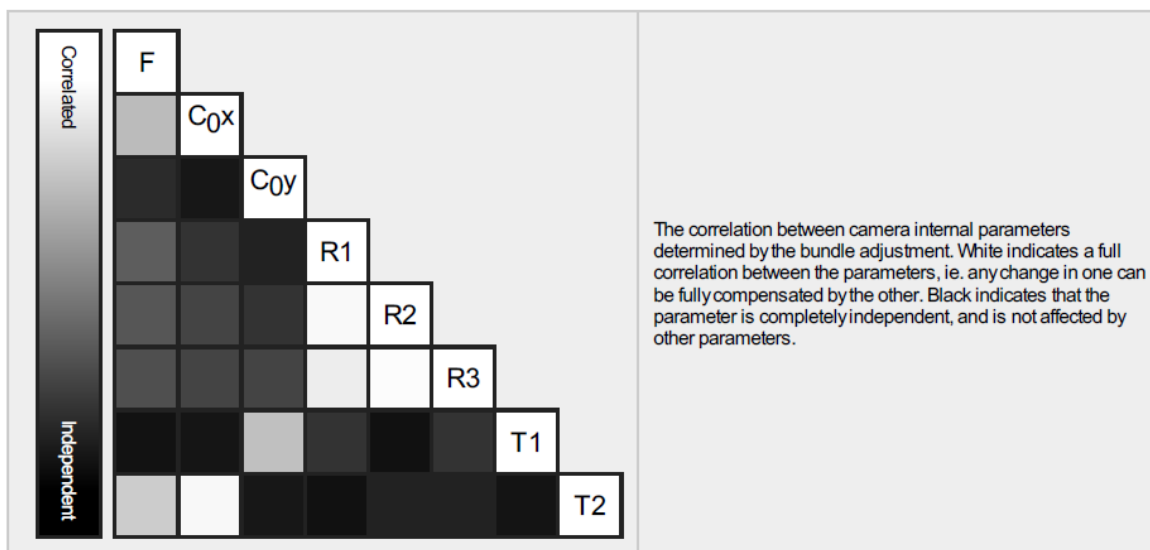
Internal Camera Parameters

DSLR-A230_55.0_3872x2176 (RGB). Sensor Dimensions: 23.476 [mm] x 13.193 [mm]



EXIF ID: DSLR-A230_55.0_3872x2176

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	9071.542 [pixel] 55.000 [mm]	1936.000 [pixel] 11.738 [mm]	1088.000 [pixel] 6.596 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	8779.086 [pixel] 53.227 [mm]	1906.622 [pixel] 11.560 [mm]	1151.023 [pixel] 6.979 [mm]	0.042	-0.668	5.115	0.002	-0.001
Uncertainties (Sigma)	1.198 [pixel] 0.007 [mm]	4.488 [pixel] 0.027 [mm]	2.736 [pixel] 0.017 [mm]	0.006	0.232	2.520	0.000	0.000



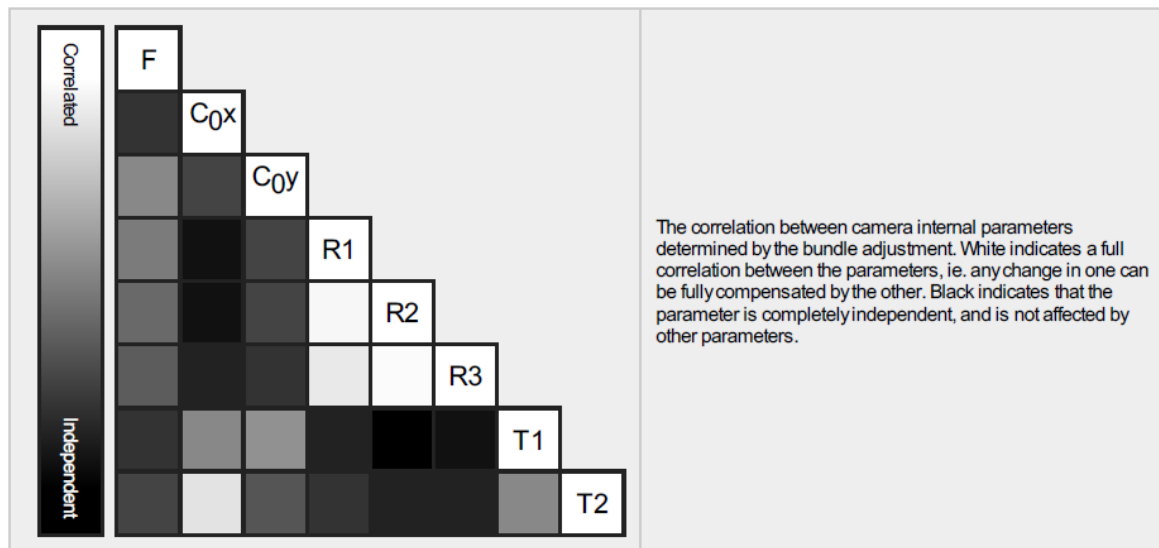
Internal Camera Parameters

DSLR-A230_18.0_3872x2176 (RGB). Sensor Dimensions: 23.333 [mm] x 13.113 [mm]



EXIF ID: DSLR-A230_18.0_3872x2176

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	2986.971 [pixel] 18.000 [mm]	1936.000 [pixel] 11.667 [mm]	1088.000 [pixel] 6.556 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	2969.950 [pixel] 17.897 [mm]	1934.141 [pixel] 11.655 [mm]	1061.799 [pixel] 6.399 [mm]	-0.090	0.015	0.009	0.000	0.000
Uncertainties (Sigma)	0.466 [pixel] 0.003 [mm]	0.702 [pixel] 0.004 [mm]	0.469 [pixel] 0.003 [mm]	0.001	0.004	0.005	0.000	0.000



The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the re-projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization. The scale bar indicates the magnitude of 1 pixel error.

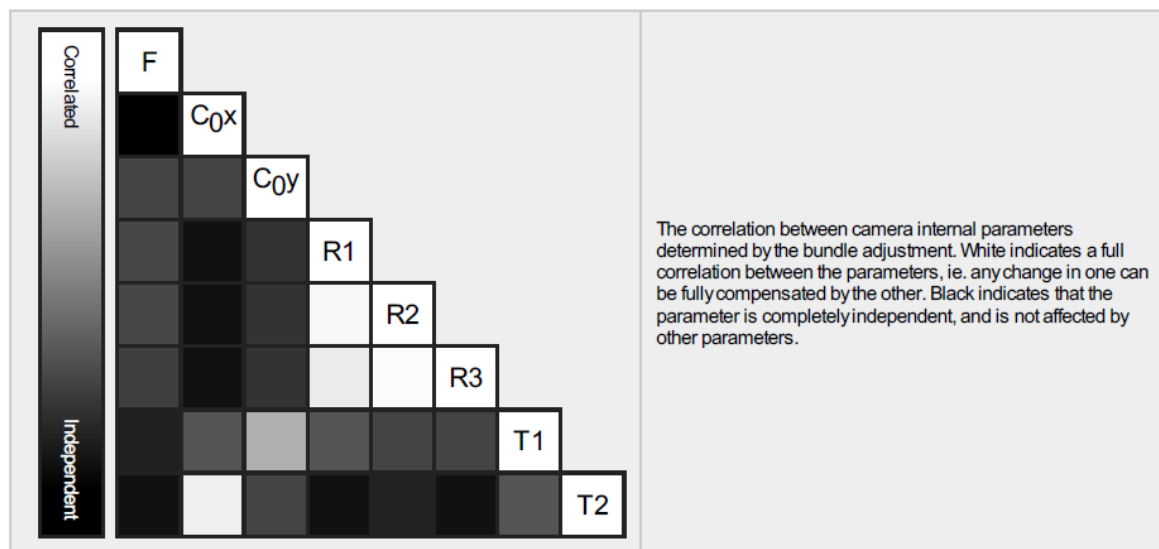
? Internal Camera Parameters

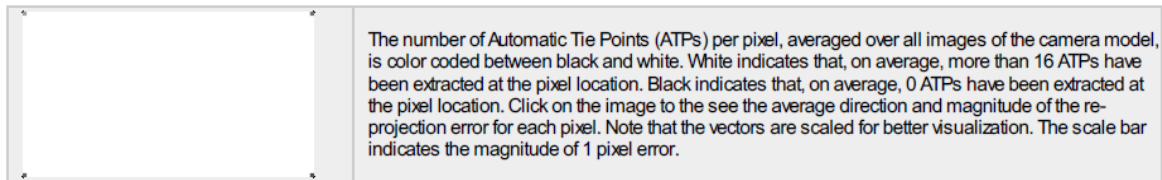
📷 DSLR-A230_24.0_3872x2176 (RGB). Sensor Dimensions: 23.333 [mm] x 13.113 [mm]



EXIF ID: DSLR-A230_24.0_3872x2176

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3982.628 [pixel] 24.000 [mm]	1936.000 [pixel] 11.667 [mm]	1088.000 [pixel] 6.556 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	3887.766 [pixel] 23.428 [mm]	1929.592 [pixel] 11.628 [mm]	1089.947 [pixel] 6.568 [mm]	-0.057	-0.009	0.021	0.000	-0.000
Uncertainties (Sigma)	0.225 [pixel] 0.001 [mm]	0.435 [pixel] 0.003 [mm]	0.329 [pixel] 0.002 [mm]	0.000	0.003	0.007	0.000	0.000





? 2D Keypoints Table



	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	3144	1972
Min	2521	160
Max	3862	2690
Mean	3153	1932

2D Keypoints Table for Camera DSLR-A230_55.0_3872x2176 (RGB)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	3183	2023
Min	2521	806
Max	3555	2690
Mean	3158	1884

2D Keypoints Table for Camera DSLR-A230_18.0_3872x2176 (RGB)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	3148	1371
Min	2541	160
Max	3565	2150
Mean	3102	1333

2D Keypoints Table for Camera DSLR-A230_24.0_3872x2176 (RGB)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	3133	1996
Min	2595	296
Max	3862	2665
Mean	3156	1998

Median / 75% / Maximal Number of Matches Between Camera Models

	DSLR-A230_55.0_... (RGB)	DSLR-A230_18.0_... (RGB)	DSLR-A230_24.0_... (RGB)
DSLR-A230_55.0_3872x2176 (RGB)	34 / 133 / 1785	1 / 1 / 1	2 / 5 / 117
DSLR-A230_18.0_3872x2176 (RGB)		39 / 137 / 1441	2 / 5 / 237
DSLR-A230_24.0_3872x2176 (RGB)			28 / 122 / 1733

? 3D Points from 2D Keypoint Matches

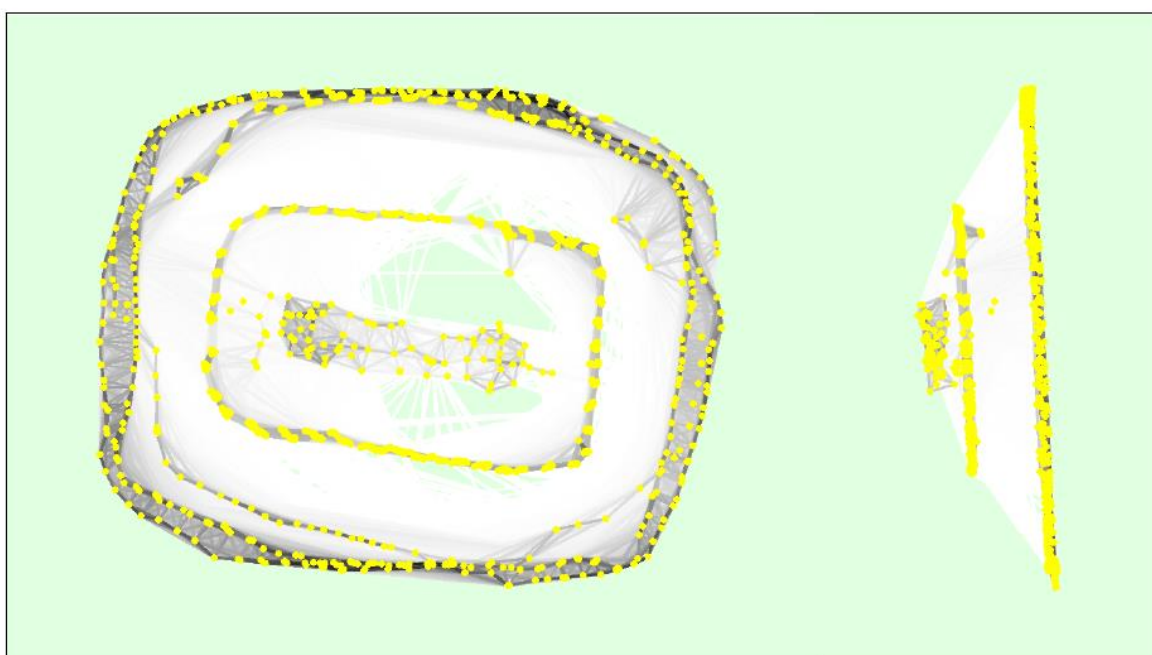


	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	284221
In 3 Images	93703
In 4 Images	48633
In 5 Images	29633
In 6 Images	20340
In 7 Images	14735
In 8 Images	11086
In 9 Images	8554
In 10 Images	6510
In 11 Images	5219

In 12 Images	4037
In 13 Images	3258
In 14 Images	2700
In 15 Images	2157
In 16 Images	1839
In 17 Images	1543
In 18 Images	1338
In 19 Images	1194
In 20 Images	1072
In 21 Images	967
In 22 Images	848
In 23 Images	759
In 24 Images	687
In 25 Images	565
In 26 Images	510
In 27 Images	467
In 28 Images	416
In 29 Images	363
In 30 Images	350
In 31 Images	285
In 32 Images	275
In 33 Images	255
In 34 Images	213
In 35 Images	212
In 36 Images	205
In 37 Images	196
In 38 Images	176
In 39 Images	147
In 40 Images	155
In 41 Images	146
In 42 Images	113
In 43 Images	110
In 44 Images	98
In 45 Images	75
In 46 Images	98
In 47 Images	90
In 48 Images	71
In 49 Images	67
In 50 Images	55
In 51 Images	61
In 52 Images	52
In 53 Images	48
In 54 Images	42
In 55 Images	38
In 56 Images	34
In 57 Images	32
In 58 Images	23
In 59 Images	26
In 60 Images	23
In 61 Images	23
In 62 Images	14
In 63 Images	20
In 64 Images	15
In 65 Images	16
In 66 Images	14
In 67 Images	9
In 68 Images	20

In 69 Images	8
In 70 Images	17
In 71 Images	12
In 72 Images	8
In 73 Images	5
In 74 Images	12
In 75 Images	11
In 76 Images	2
In 77 Images	8
In 78 Images	7
In 79 Images	5
In 80 Images	3
In 81 Images	9
In 82 Images	3
In 83 Images	2
In 84 Images	2
In 85 Images	2
In 86 Images	1
In 87 Images	1
In 88 Images	3
In 89 Images	2
In 90 Images	3
In 91 Images	1
In 92 Images	1
In 93 Images	2
In 94 Images	3
In 96 Images	1
In 97 Images	2
In 98 Images	1
In 99 Images	2
In 100 Images	1
In 101 Images	2
In 103 Images	1
In 105 Images	1
In 118 Images	1

? 2D Keypoint Matches



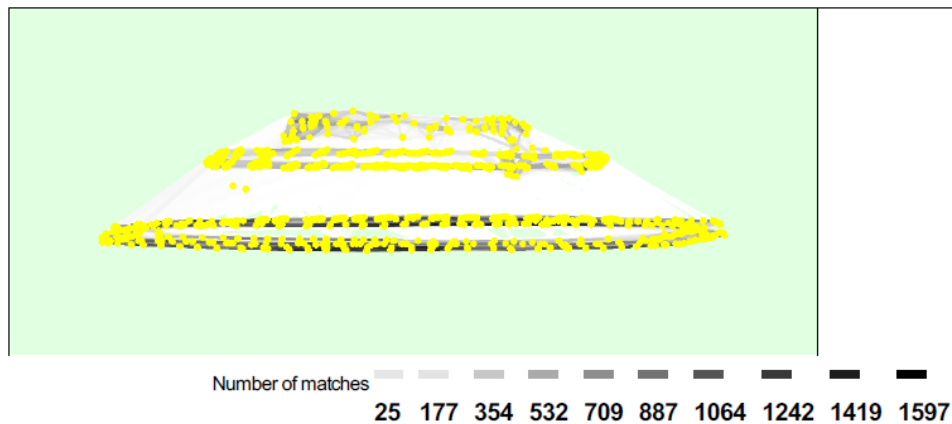


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-6700 CPU @ 3.40GHz RAM: 64GB GPU: NVIDIA GeForce GTX 1060 3GB (Driver: 23.21.13.8813)
Operating System	Windows 10 Education N, 64-bit

Coordinate Systems

Output Coordinate System	Arbitrary (m)
--------------------------	---------------

Processing Options

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Rapid, Image Scale: 0.25
Advanced: Matching Image Pairs	Free Flight or Terrestrial
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Custom Maximum Octree Depth: 16 Texture Size [pixels]: 32768x32768 Decimation Criteria: Qualitative, Strategy: Sensitive Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1

Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes

Results

Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	17887213
Average Density (per m ³)	117.88